

# Untersuchungen zum Verdrucken von Interferenzeffektfarben im Flexodruckverfahren

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

**D I S S E R T A T I O N**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Martin Haas

aus Ingolstadt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jung

Datum der Einreichung: 31.01.2012

Datum der mündlichen Prüfung: 02.05.2012

Darmstadt 2012

D17





## Kurzfassung

Die Veredelung von Druckprodukten gewinnt vor allem im Verpackungsdruck seit Jahren an Bedeutung. Dazu werden häufig Interferenzeffektpigmente verwendet, die je nach Art und Betrachtungswinkel ihre Farbwirkung ändern und spezielle Glanzeffekte ermöglichen.

Leider sind Farben mit solchen Pigmenten im Vergleich zu gewöhnlichen Druckfarben relativ teuer und es existieren keine Messgeräte, die zu einer Prozesskontrolle in der Druckmaschine verwendet werden können. Eine Messung des Farbwechsels mit Mehrwinkelspektrofotometern findet in der Praxis nur in wenigen Fällen statt. Eine Bewertung erfolgt üblicherweise rein subjektiv durch eine visuelle Abmusterung.

In dieser Arbeit wurden zunächst die wichtigsten Parameter identifiziert, die beim Verdrucken von Interferenzeffektfarben im Flexodruck für die größten Effekte und die beste Druckqualität verantwortlich sind. Dazu wurde ein umfangreicher Druckversuch auf einer Rollendruckmaschine mithilfe der Methoden der statistischen Versuchsplanung erstellt, die produzierten Druckproben bezüglich ihrer optischen Effekte vermessen, nach ihrer Homogenität bewertet und die Daten mithilfe einer Regressionsanalyse ausgewertet. Es stellte sich heraus, dass der Einfluss der verwendeten Materialien auf die optischen Effekte der Proben größer ist als der der drucktechnischen Einstellungen an der Druckmaschine. Durch eine Betrachtung der unterschiedlichen Materialkosten, konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, bei der Veredelung Kosten zu sparen, ohne dabei die optischen Effekte zu schmälern.

Die weiteren Forschungsaktivitäten widmeten sich der Untersuchung frisch gedruckter Interferenzeffektfarben mit einem in der Druckbranche üblichen Druckinspektionssystem. Da eine parallele Orientierung der Pigmente zum Bedruckstoff als Grundvoraussetzung für gute Effekte gilt [1] und Versuche gezeigt haben, dass sich eine schnelle Trocknung positiv auf die Farbwirkung auswirkt, wurde untersucht, ob sich dies auf eine Umorientierung der Pigmente in der Farbschicht zurückführen lässt. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Ausrichtung der Pigmente nach ungefähr 1,5 Sekunden nach dem Abdruck kaum mehr ändert.

Weiterhin wurde überprüft, ob ein kamerabasiertes Druckinspektionssystem für die Inline-Prozesskontrolle von gedruckten Interferenzeffektfarben geeignet ist. Dazu wurde die Helligkeitsdifferenz  $L_H$  nach *Hupp* [2] gemessen, die sich linear mit der gedruckten Schichtdicke ändert. Obwohl sich ein Druckinspektionssystem generell zur Messung von  $L_H$  eignet, zeigte sich nicht die erwartete Korrelation zu den gemessenen Schichtdicken. Dies kann auf eine nicht vollkommen homogene Beleuchtung der Detektionsstelle und auf die Messunsicherheiten bei der Schichtdickenmessung zurückgeführt werden.



## Abstract

For years, particularly in the field of package printing, finishing processes gain more and more importance. Therefore often interference effect pigments are used, which offer special gloss effects and change their color impression based on the physical effect of thin layer interference, depending on their type and the viewing angle.

Unfortunately inks including such pigments are quite expensive compared to common printing inks. Moreover no measuring tools are available, which enable an inline process control within the printing machine. In printing praxis their color shift is rarely measured using multi-angle spectrophotometers. It is usually estimated by subjective color matching.

First of all for flexographic inks including interference effect pigments the most important influencing parameters which are responsible for causing highest effects and best printing quality have been identified. Therefore a systematic printing trial on a web fed printing machine was planned using Design of Experiment (DoE) methods. All samples were measured concerning their optical effects and evaluated regarding their homogeneity. All data has been interpreted using regression analysis. It turned out, that the impact of the used materials is greater than the one caused by the settings of the printing machine. Having had a look at the different material costs, it was possible to show that it is feasible to save costs during the finishing process without reducing the optical effects.

Further research was dedicated to the examination of printed interference effect inks right after their application using an inspection system which is widely used in the printing industry. As parallel orientation of the pigments to the substrate is said to be a basic requirement for good effects [1], and as quick drying advances the color shift effect of the pigments, which was shown by the printing trials, it was analyzed, whether this phenomena was caused by a reorientation of the pigments within the ink layer. It was shown that the alignment of the pigments does rarely change 1,5 seconds after printing.

Furthermore it was tested, if a camera-based inspection system is suitable for an inline process control of printed interference effect layers. Therefore the brightness difference  $L_H$  by *Hupp* [2] was measured, which changes linearly with the printed layer thickness. Although an inspection system for printing products is generally qualified for measuring  $L_H$ -values, the expected correlation could not be demonstrated. This can be attributed to a not complete homogeneous illumination of the detection area and to the uncertainties in measuring the layer thickness.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam für sein Vertrauen mir gegenüber, die vielen Diskussionen und Anregungen, die fürsorgliche Unterstützung meiner Arbeit und seinen unermüdlichen Glauben an meinen Erfolg.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Jung, Leiter des Forschungsgebiets Digital- und Offsetdruck der Bergischen Universität Wuppertal für die Übernahme des Koreferats.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren für die vielen hilfreichen Diskussionen und Informationen sowie die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Besonders danke ich Frau Dr.-Ing. Kathrin Happel für ihr Interesse an meiner Arbeit, ihre fachlichen Anregungen und ihre Zeit für meine “Einführung” in MATLAB. Weiterer Dank geht an Meister Euler und Evgeny Kurmakaev für die drucktechnische Beratung, die Durchführung von Druckversuchen und die erfolgreiche Zusammenarbeit in den letzten Jahren. Für die ausgiebigen Diskussionen und die Korrekturen zur statistischen Versuchsplanung bedanke ich mich bei Marcel Mahner B.Sc., für die disziplinierte Durchführung und Auswertung vieler Druckversuche bei Christopher Diez und Waheed Hussain.

Ein besonderer Dank gilt den Herren Dr. E. Fergen, Dr. M. Schmitt-Lewen und J. Sonnenschein von *Heidelberger Druckmaschinen* für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung meiner Arbeit und die spannende und stets kollegiale Zusammenarbeit im Rahmen unseres bilateralen Projekts. Herrn A. Becker von *Merck* danke ich für die großzügig zur Verfügung gestellte Menge an Interferenzeffektfarben.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meiner Freundin Frau Maria Fedutina M.Sc. für ihre fachlichen Diskussionen, das Korrektur lesen und die mentale Unterstützung sowie bei meinen Eltern, die meine Ausbildung und meinen Lebensweg immer unterstützt haben.

Darmstadt, Juni 2012

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Ausgangssituation und Ziel</b>	<b>5</b>
2.1 Effektpigmente . . . . .	5
2.1.1 Einteilung von Effektpigmenten . . . . .	5
2.1.2 Optische Wirkung von Interferenzeffektpigmenten . . . . .	7
2.1.3 Verwendung in der Druckindustrie . . . . .	12
2.2 Flexodruck . . . . .	15
2.2.1 Grundlegendes zum Flexodruck . . . . .	15
2.2.2 Flexodruckfarben . . . . .	19
2.2.3 Bedruckstoffe . . . . .	20
2.2.4 Lackierwerk zur Veredelung im Offsetdruck . . . . .	20
2.3 Qualitäts- und Prozesskontrolle in der Druckindustrie . . . . .	22
2.3.1 Möglichkeiten der Durchführung von Qualitäts- und Prozesskontrollen . . . . .	22
2.3.2 Farbdichtemessung . . . . .	23
2.3.3 Farbmessung . . . . .	26
2.3.4 Glanzmessung . . . . .	28
2.3.5 Messung von Veredelungseffekten . . . . .	30
2.3.6 Trend zur Inline-Messung . . . . .	34
2.4 Ziele der Arbeit und Vorgehensweise . . . . .	35
<b>3 Qualitätsmerkmale gedruckter Effektpigmentfarben</b>	<b>41</b>
3.1 Definition der Qualitätsmerkmale . . . . .	41
3.1.1 Messung des Color-Shift . . . . .	42
3.1.2 Glanzmessung . . . . .	46
3.1.3 Homogenität . . . . .	47

## INHALTSVERZEICHNIS

---

3.2	Messmittelanalysen . . . . .	48
3.2.1	Color-Shift und Glanz . . . . .	48
3.2.2	Vergleich der Mehrwinkelspektrofotometer <i>FX10</i> und <i>MA98</i> . . . . .	54
3.2.3	Homogenität . . . . .	57
3.2.4	Messung der gedruckten Schichtdicken . . . . .	61
3.3	Fazit . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Erfahrungen beim Verdrucken von Effektpigmenten</b>	<b>67</b>
4.1	Erkenntnisse initialer Versuche . . . . .	67
4.2	Einfluss der Überlackierung . . . . .	69
4.3	Einfluss unterschiedlicher Tonwerte . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Eruierung der Haupteinflussfaktoren mithilfe der statistischen Versuchsplanung</b>	<b>77</b>
5.1	Ziel und Ablauf . . . . .	79
5.2	Versuchsplanung . . . . .	80
5.2.1	Problemdefinition . . . . .	82
5.2.2	Zielgrößen . . . . .	82
5.2.3	Systemanalyse - Die modulare Rollendruckmaschine Gallus RCS330-HD als Versuchsplattform . . . . .	83
5.2.4	Qualitatives Prozessmodell . . . . .	87
5.2.5	Hypothesen für den Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen . . . . .	88
5.2.6	Einstellbereich der Einflussfaktoren . . . . .	89
5.2.7	Hypothetisches Regressionsmodell . . . . .	90
5.2.8	Wahl des geeigneten Versuchsplantyps . . . . .	93
5.3	Versuchsdurchführung . . . . .	97
5.4	Versuchsauswertung . . . . .	98
5.4.1	Analyse der Daten . . . . .	98
5.4.2	Regressionsmodell . . . . .	105
5.4.3	Regressionsanalyse . . . . .	106
5.4.4	Ergebnisse und physikalische Interpretation . . . . .	109
5.4.5	Kostenbetrachtung . . . . .	117
5.5	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	120
5.5.1	Folgerungen aus der Screening-Versuchsreihe . . . . .	120
5.5.2	Streuung durch Inhomogenität . . . . .	123
5.5.3	Empfehlungen für den Anwender . . . . .	125



<b>6</b>	<b>Kamerabasierte Messung von gedruckten Effektpigmenten</b>	<b>127</b>
6.1	Aufbau des Versuchsstandes . . . . .	127
6.1.1	Kamera . . . . .	132
6.1.2	Beleuchtung . . . . .	134
6.1.3	Blenden . . . . .	139
6.1.4	Dynamik beim Druckvorgang . . . . .	142
6.2	Untersuchung der Pigmentorientierung . . . . .	143
6.3	Überprüfung der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle . . . . .	154
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>
<b>A</b>	<b>Technische Daten und zusätzliche Informationen</b>	<b>175</b>
<b>B</b>	<b>Tabellen zur Regressionsanalyse</b>	<b>185</b>
<b>C</b>	<b>Kamerabasierte Messungen</b>	<b>189</b>

## INHALTSVERZEICHNIS

---

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

ART	Anilox Reverse Technology (Gravurart für Rasterwalzen)
as	Aspektwinkel, Winkel zwischen Beobachtungs- und Glanzwinkel
ASTM	American Society for Testing and Materials
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function, bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion
CCD	Charge-coupled Device, ladungsgekoppeltes Bauteil
CIE	Commision Internationale de l'Éclairage, Internationale Beleuchtungskommission
CIELAB	CIE $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ Farbraum
CMYK	Cyan - Magenta - Yellow - Key plate (Black)
Cornerstone <sup>TM</sup>	Softwarepaket für explorative Datenanalyse (EDA), statistische Versuchsplanung (DoE) von camLine Daten-systeme
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DoE	Design of Experiments, statistische Versuchsplanung
DOI	Distinctness of Image, Abbildeschärfe
dpi	dots per inch, Punkte pro Inch, Maßeinheit für die Auflösung
EFTA	European Flexographic Technical Association
IR	Infrarotstrahlung
ISO	International Standardization Organization
MATLAB	matrix laboratory, Softwarepaket für numerische Mathematik von Math-Works
OPP	orientiertes Polypropylen
p-Wert	Irrtumswahrscheinlichkeit
PSO	Prozessstandard Offsetdruck

## Symbole

---

RGB	RGB-Farbraum, Rot-Grün-Blau
RMS-Error	Root Mean Square-Error, mittlere quadratische Abweichung, entspricht der Standardabweichung der Residuen $\sigma_R$
UV	Ultraviolettstrahlung
VDD	Verein Deutscher Druckingenieure e.V.
XYZ	XYZ-Farbraum, Normfarbwerte X, Y und Z

## Symbole

$a^*$	Grün-Rot-Komponente des CIELAB-Farbraums, dimensionslos
$b$	Koeffizient des Regressionsmodells, durch die Regression zu bestimmen, dimensionslos
$b^*$	Blau-Gelb-Komponente des CIELAB-Farbraums, dimensionslos
$c_P$	Pigmentkonzentration in Gewichtsprozent ( <i>Gew.</i> – %)
$df$	degrees of freedom, Anzahl der Freiheitsgrade, Anzahl der unabhängigen Parameter zur Beschreibung einer Zielgröße im Regressionsmodell, entspricht $n - p$ , dimensionslos
$d_S$	Beschichtungsdicke in $nm$
$e$	statistischer Fehler des Regressionsmodells, Residuum, Abweichung zwischen dem gemessenen und dem durch das Modell berechneten Wert der Zielgröße, dimensionslos
$e^*$	studentisiertes Residuum, Residuum geteilt durch die Standardabweichung, dimensionslos
$F_{x_i}$	Farbwert, dimensionslos
$F(\tilde{x})$	Verteilungsfunktion einer t-Verteilung am Grenzwert $\tilde{x}$
$G$	Glanzwert, visuelle Glanz-Zahl nach <i>DIN 16537</i>
$g_S$	Grammatur, Flächengewicht eines Substrats in $g/m^2$
$I$	Lichtintensität in $W/m^2$ , einfallende Lichtintensität $I_E$ , reflektierte Lichtintensität $I_R$ , transmittierte Lichtintensität $I_T$ , Lichtintensität unter $90^\circ$ $I_{90^\circ}$ , unter $45^\circ$ $I_{45^\circ}$
$L_H$	Helligkeitsdifferenz nach <i>Hupp</i> , entspricht $L^*_F - L^*_S$ , dimensionslos
$L_{H,K}$	Helligkeitsdifferenz nach <i>Hupp</i> , gemessen mit der Kamera des Druckinspektionssystems, dimensionslos

$L^*$	Helligkeit im CIELAB-Farbraum, Wertebereich $0 \dots 100$ , dimensionslos
$m$	Anzahl der Einflussgrößen, entspricht bei linearem Regressionsmodell $p - 1$ , dimensionslos
$n$	Anzahl der Versuche beziehungsweise der Proben, dimensionslos
$\tilde{n}$	Brechungsindex, Brechzahl, dimensionslos
$o_{out}$	Schwellenwert der Ausreißer (Outlier), dimensionslos
$p$	Anzahl der Terme im Modell (inklusive der Konstante), dimensionslos
$P$	Quadratmeterpreis der Materialkosten einer Druckprobe in $\text{€}/\text{m}^2$ . Dieser setzt sich aus dem $P_S$ Substratpreis und $P_F$ Effektfarbenpreis ( $\hat{=} P_P$ Pigmentpreis $+ P_L$ Lackpreis) zusammen.
$\tilde{p}$	Kilopreis der Materialien in $\text{€}/\text{kg}$ , $\tilde{p}_S$ Substratpreis, $\tilde{p}_P$ Pigmentpreis, $\tilde{p}_L$ Lackpreis
$q$	Anzahl der fehlenden Faktoren (Zuordnungen) bei einem teilfaktoriellen Versuchsplan, dimensionslos
$R$	Reflexionsgrad einer Grenzfläche, Quotient der reflektierten zur einfallenden Lichtintensität, abhängig vom Einfallswinkel $\varepsilon'_1$ des Lichts, dimensionslos, $R_{\parallel}$ parallele Komponente des Reflexionsgrads, $R_{\perp}$ senkrechte Komponente des Reflexionsgrads
$r_k$	Reflexionskoeffizient der ersten Grenzfläche, $r_k(m)$ Reflexionskoeffizient der m-ten Grenzfläche, dimensionslos
$R^2$	Bestimmtheitsmaß einer Regression
$R^2_{adj}$	adjustierte Bestimmtheitsmaß einer Regression
$r$	Freiheitsgrad der t-Verteilung, entspricht bei einer Regression $df - 1$ , dimensionslos
$S(\lambda)$	Spektrum einer Lichtquelle
$s$	Anzahl der Stufen einer Einflussgröße, dimensionslos
$T$	theoretischer/nomineller Tonwert der Flexodruckform in %
$t_r^{-1}$	Umkehrfunktion der t-Verteilung mit Freiheitsgrad $r$ , Wert der Verteilungsfunktion als Eingabewert
$t$	Zeit in s
$v_{th}$	theoretisches Schöpfvolumen (flächenbezogen) einer Rasterwalze beziehungsweise eines Bandes einer Bänderwalze in $\text{cm}^3/\text{m}^2$
$\mathbf{X}$	Koeffizientenmatrix, Matrix aus den Termen der Einflussgrößen
$x$	Einflussgröße eines Regressionsmodells

## Symbole

---

$\vec{x}_i$	Primärvalenz
$\bar{x}_i(\lambda)$	Spektralwertfunktion
$\tilde{x}$	Grenzwert für Umkehrfunktion der t-Verteilung, dimensionslos
$y$	Zielgröße eines Regressionsmodells
$\beta$	Strahldichtefaktor, dimensionslos
$\beta(\lambda)$	Reflexionsspektrum, spektraler Strahldichtefaktor
$\Delta E_H^*$	Color-Shift, Farbabstand nach <i>Hupp</i> , Farbabstand zwischen den Beobachtungswinkeln $90^\circ$ und $120^\circ$ bei einem Beleuchtungswinkel von $45^\circ$ im CIE $L^*, a^*, b^*$ -Farbraum, dimensionslos
$\varepsilon'_1$	Ausfallswinkel des Lichts in $^\circ$
$\varepsilon''_1$	Brechungswinkel des Lichts in $^\circ$
$\lambda$	Wellenlänge des Lichts in $nm$
$\varphi(\lambda)$	Farbreizfunktion
$\rho$	Korrelationskoeffizient, Beschreibung von Kollinearitäten zwischen Einflussgrößen, Wertebereich $[-1, 1]$
$\rho_P$	mittlere Dichte der Interferenzeffektpigmente in $g/cm^3$
$\sigma$	Standardabweichung, Standardabweichung der Residuen $\sigma_R$
$\tau(\lambda)$	Transmissionsspektrum

# Einführung

Durch die steigenden Ansprüche gegenüber Druckprodukten wird immer mehr Wert auf deren Veredelung gelegt. Während vor zehn Jahren Tageszeitungen und die meisten Lehrbücher noch in Schwarz-Weiß gedruckt wurden, gilt ein Druckprodukt im Vierfarbensatz (Cyan-Magenta-Yellow-Black, CMYK) heute bereits als langweilig [3]. Moderne Druckprodukte zeichnen sich zunehmend durch die Verwendung von Sonderfarben, Lackierungen und verschiedenen Veredelungstechniken aus. Dabei lässt die subjektive Wahrnehmung von Farbeffekten und Glanz Druckerzeugnisse ästhetisch und elegant wirken, bietet Anreize und weckt Kaufwünsche [4]. Gerade bei Konsumgütern spielen Veredelungen der Verpackungen neben dem Preis offensichtlich eine entscheidende Rolle bei der Kaufentscheidung des Kunden [5, 6]. Eine edle Verpackung verspricht eine gute Produktqualität, die einen gewissen Preis rechtfertigt. Beispielsweise kann durch eine wirklichkeitsgetreue Wiedergabe von Goldtönen durch den Prägefoliendruck die Wertigkeit eines Produkts erhöht und durch diese Emotionalisierung ein Erlebniskauf begünstigt werden [7]. Einen umfangreichen Überblick über die heutigen Möglichkeiten der Druckveredelung bietet *Morlok* [8]. Selbst bei Discounter-Marken werden heutzutage Veredelungen eingesetzt [9], so dass die Verpackung sogar einen großen Anteil des Gesamtproduktpreises einnimmt. Je wertvoller ein Produkt ist, desto geringer fallen die Kosten der Verpackungsveredelung ins Gewicht, und umso mehr erwartet der Kunde eine drucktechnisch hochwertig veredelte Verpackung.

Bei Zeitschriften und Magazinen steigern Druckveredelungen die Kosten des Gesamtprodukts jedoch erheblich, wodurch deren Einsatz gründlich abzuwägen ist. Auch aufgrund des kontinuierlichen Umsatzrückgangs in der Druckbranche in den letzten zehn Jahren, der sinkenden Ertragslage durch deutlich höhere Energiekosten und steigender Materialkosten [10] ist es für Kunden und Druckereien wichtig, Veredelungstechniken von Druckprodukten möglichst effektiv und kostengünstig einzusetzen. Dies ist von großer Bedeutung, um der gesunkenen Auftragslage, die durch das elektronische Zeitalter begünstigt wurde, und der damit größeren Konkurrenz innerhalb der Branche gewachsen zu sein. Im Titel “Wachstumsmarkt Verpackungsdruck - Veredeln, individualisieren, Kosten sparen” des Magazins *Der Druckspie-*

## 1. EINFÜHRUNG

---

gel, Heft 8-9 2011, spiegelt sich dieser Trend wider. Der Artikel “Veredelten Verpackungen gehört die Zukunft” [9] beschreibt dabei die Herausforderungen der Entwicklung luxuriöser und dennoch bezahlbarer Verpackungen.

Eine Möglichkeit der Druckveredelung stellt das Verdrucken von Effektpigmentfarben dar. Sie sind aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften im Verpackungs-, Textil- und Möbeldekorfoliendruck weit verbreitet [1]. Effektpigmente gelten allgemein als relativ teuer [8], was je nach Typ, Material und Herstellungsverfahren einen Kilopreis von bis zu 500 € bedeutet. Eine in der Drucktechnik häufig verwendete Art von Effektpigmenten sind Interferenzeffektpigmente. Sie verändern abhängig vom Pigmentaufbau je nach Betrachtungswinkel durch den physikalischen Effekt der Interferenz ihre Farbe, bewirken ein Glänzen der gedruckten Schicht und können einen Glitzer-Effekt hervorrufen.

Besonders im Verpackungsdruck wird das Flexodruckverfahren sowohl im Rollendruck in verschiedenen Druckmaschinenversionen als auch beim Bogenoffsetdruck in Lackierwerken, zum Verdrucken von Effektpigmenten auf unterschiedlichsten Materialien eingesetzt [11].

Während sich bei konventionellen Druckprodukten (ohne Veredelungen) gewisse Druckstandards durchgesetzt haben (z. B. [12, 13]), die ständig weiterentwickelt und ergänzt werden [14], so gibt es diese für Druckveredelungen nur im Bereich der Glanzmessung. Trotz ihrer Produktion in modernsten Druckmaschinen, sind veredelte Druckprodukte oft der visuellen Begutachtung durch das Auge des Kunden und dessen subjektiver Meinung ausgesetzt. Der Grat zwischen Makulatur und Nutzen ist dadurch nicht selten sehr schmal.

Daher ist es ein Ziel dieser Arbeit, durch eine umfangreiche Versuchsreihe und die Anwendung der Methoden der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments - DoE), die Haupteinflüsse drucktechnischer und materialspezifischer Parameter auf die Qualität von Druckproben, die mit verschiedenen Interferenzeffektpigmentfarben bedruckt wurden, zu erkennen und zu diskutieren. Mit diesem Ergebnis können dem Anwender (Drucker) Empfehlungen gegeben werden, wie beim Verdrucken von Interferenzeffektpigmenten ein Kompromiss aus möglichst großen Effekten und möglichst geringen Kosten gefunden werden kann.

Aus der Sicht eines Druckmaschinenherstellers sind besonders die drucktechnischen und verfahrenstechnischen Einflüsse interessant, die die von den Interferenzeffektpigmenten hervorgerufenen Veredelungseffekte und die Druckqualität verbessern. Deshalb wird in einem weiteren Schritt das Bedrucken und Trocknen verschiedener Substrate mit unterschiedlichen Interferenzeffektpigmenten mit einem kamerabasierten Druckinspektionssystem betrachtet. Ziel ist es mögliche zeitliche Veränderungen, die sich dabei aus den aufgezeichneten Kameradaten beobachten oder berechnen lassen, hinsichtlich einer potenziellen Umorientierung der Pigmente nach dem Verdrucken zu deuten.

Weiterhin wird überprüft, ob sich solch ein System zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektpigmentfarben eignet. Dabei wird der von *Hupp* zur Prozesskontrolle [15] eingeführte Helligkeitswert  $L_H$  aus



---

den Kameradaten berechnet und anhand von Referenzmessungen überprüft. In dieser Arbeit sind im Folgenden mit Effektpigmenten immer Interferenzeffektpigmente gemeint. Werden andere Pigmentarten angesprochen, so wird dies explizit erwähnt.

## 1. EINFÜHRUNG

---

## 2

# Ausgangssituation und Ziel

In diesem Kapitel wird zuerst die Klassifizierung von Effektpigmenten aufgezeigt, deren optische Wirkung erklärt und Einsatzbereiche in der Druckindustrie dargestellt. Anschließend wird auf den Flexodruckprozess, die dafür verwendeten Farben und Bedruckstoffe (Substrate) und das Lackierwerk in einer Bogenoffsetmaschine, das verfahrenstechnisch ein Flexodruckwerk ist, eingegangen. Aus den vorgestellten Qualitäts- und Prozesskontrollsystemen der grafischen Industrie werden diejenigen hervorgehoben, die für veredelte Druckprodukte eingesetzt werden. In den beiden letzten Abschnitten werden bisherige wissenschaftliche Bemühungen zur effektiven Veredelung von Druckprodukten mit Interferenzeffektpigmenten angesprochen sowie Ziele und Vorgehensweise dieser Arbeit aufgezeigt.

## 2.1 Effektpigmente

Heutzutage begegnen uns Effektpigmente im Vergleich zu früheren Zeiten an vielen Stellen des täglichen Lebens, in Kosmetikprodukten, auf den Titelseiten von Magazinen, in Spielwaren und Autolackierungen. Mit einem verbreiteten Einsatz steigt deren wirtschaftliche Bedeutung und das Bedürfnis nach möglichst effektivem Einsatz. Dieser Abschnitt liefert eine Einführung in die Einteilung, Wirkung und Anwendungsbereiche von Effektpigmenten. Für detailliertere Informationen sei auf die angegebene Fachliteratur verwiesen. Einen sehr guten Überblick bietet beispielsweise *Pfaff* [1].

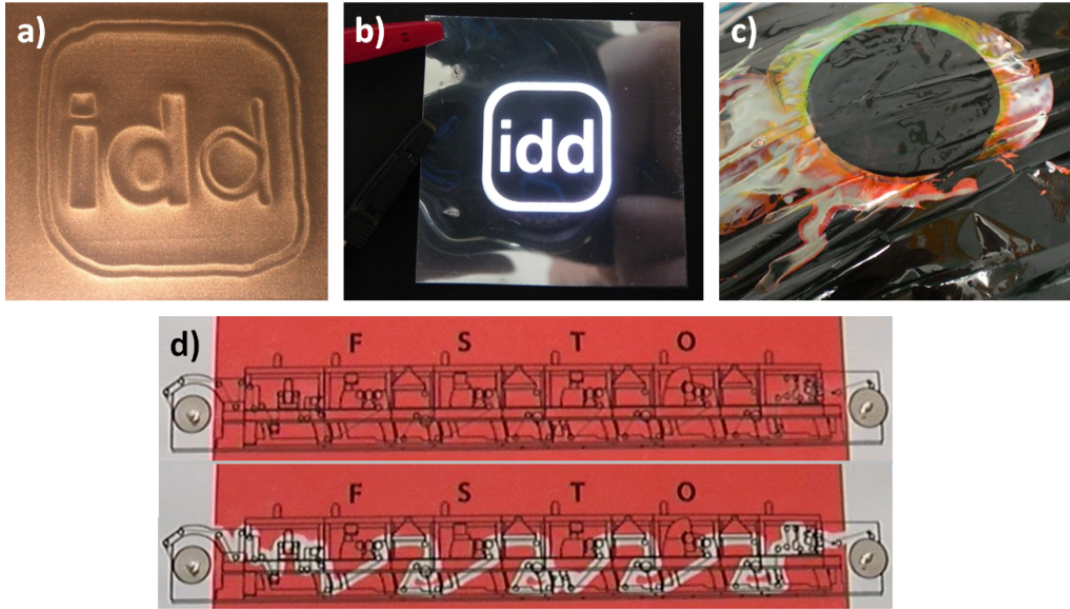
### 2.1.1 Einteilung von Effektpigmenten

Allgemein gehören Pigmente zu den Farbmitteln, sind praktisch unlöslich und werden aufgrund ihres Deckvermögens, ihrer Lichtechtheit und gesundheitlichen Unbedenklichkeit in Druckfarben fast ausschließlich eingesetzt [15]. Mit Effektpigmenten sind generell verschiedenste Pigmentarten gemeint, die sich von den gewöhnlichen Absorptionspigmenten unterscheiden. Dies umfasst hauptsächlich Fluoreszenz-, Metalleffekt-, Magneteffekt-, Thermochrom- und Interferenzeffektpigmente. Abbildung 2.1 zeigt einige

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

vom Autor am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren hergestellten Druckprodukte, die auf den Eigenschaften spezieller Pigmente und Farben beruhen.



**Abbildung 2.1:** Beispiele von Druckprodukten mit speziellen Pigmenten und Farben

a: Magneteffektfarbe - Ein dreidimensional wirkender Effekt entsteht durch ferromagnetische Eisenoxidpigmente, die sich in der Druckfarbe befinden. Diese werden vor bzw. während der Farbtrocknung durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet.

b: Mit Spiegelfarbe veredelter Elektrolumineszenzdemokrator - Ein Spiegeleffekt entsteht durch besonders hochwertige Metalleffektpigmente, die auf die Folienrückseite gedruckt werden und sich dadurch sehr eben anordnen können. Von der Rückseite betrachtet besitzt diese Schicht ein mattes Aussehen.

c: Druckfarbe mit cholesterischen Flüssigkristallen - Änderung der Farbwirkung durch selektive Reflexion in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel (ähnlich wie bei Interferenzeffektpigmenten) und durch Temperatureinwirkung. Hier geschieht - ähnlich wie bei thermochromen Farben - bei einer Temperatur von  $70^{\circ}\text{C}$  der Übergang der flüssigkristallinen in die isotrope Phase, wodurch das Fluid über der kreisförmigen Heizplatte transparent wird (vgl. [16]).

d: Thermochrome Farbe - Effekt durch Thermochrompigmente, die bei einer Temperaturerhöhung über einen bestimmten Wert transparent werden oder in eine andere Farbe übergehen. Der Prozess ist reversibel. Hier geschieht die Aufheizung durch den Strom, der durch eine mit leitfähiger Silberfarbe gedruckte Linie fließt: Der Bahnlauf der Rollendruckmaschine (siehe Kapitel 5.2.3) wird sichtbar.

Unter dem Begriff Spezialfarben bietet beispielsweise die Firma *Printcolor* in der Schweiz, eine Vielzahl von Druckfarben mit optischen, haptischen, olfaktorischen, sensorischen, elektrischen, mechanischen, schützenden und klebenden Eigenschaften zur Veredelung, zum Schutz und für Sicherheitsanwendungen von Druckprodukten an. Die speziellen Eigenschaften dieser Farben werden ebenfalls hauptsächlich durch spezielle Pigmenttypen erzeugt.

Die im Verlauf dieser Arbeit weiterhin betrachteten Interferenzeffektpigmente können in zwei Generationen eingeteilt werden. Die der 1. Generation bewirken einen einfachen Color-Shift von farbig zu transpa-

rent, die der 2. Generation einen zweifachen, von einer Farbe zu einer anderen oder weisen ausgeprägten Glitzer auf [15]. Pigmente der 1. Generation werden auch als Shifter, die der 2. Generation als Traveller bezeichnet [17]. Metalleffektpigmente können in “leafing” und “non-leafing”-Typen eingeteilt werden. Unter “leafing” wird ein Aufschwimmen und eine damit verbundene Orientierung der Pigmente an der Oberfläche einer Beschichtung verstanden. Die Pigmente bilden dort eine nahezu lückenlose Schicht und besitzen hohes Reflexionsvermögen und liefern den Eindruck einer metallischen Oberfläche [18] (vgl. Abbildung 2.1b). Interferenzeffektpigmente zählen bis auf wenige Ausnahmen zu den “non-leafing”-Pigmenten, die sich gleichmäßig im Lack verteilen und vollständig benetzt werden [18]. Die optische Wirkung von Interferenzeffektpigmenten wird im folgenden Abschnitt erklärt.

### 2.1.2 Optische Wirkung von Interferenzeffektpigmenten

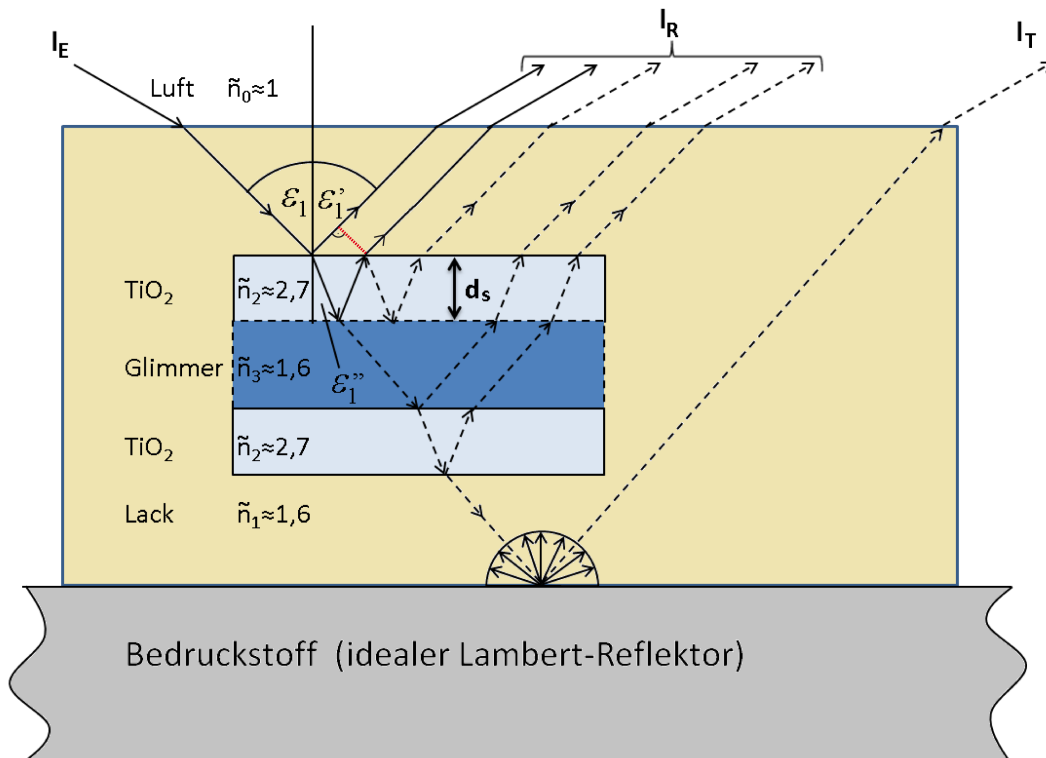
Die Effektwirkung der Interferenzeffektpigmente stützt sich auf ihre optischen Eigenschaften. Der visuelle Gesamteindruck, den der Betrachter eines veredelten Druckprodukts erhält, ergibt sich im Wesentlichen aufgrund von zwei physikalischen Phänomenen. Ein Teil des Lichts wird direkt von der Lackoberfläche oder den darunterliegenden Grenzflächen zurück in das Auge des Betrachters reflektiert, was bei einer gerichteten Reflexion auf glatter Oberfläche als glänzend empfunden wird. Der generell größere Teil des Lichts dringt in die Schicht ein, tritt in Wechselwirkung mit den Pigmenten und bewirkt Farbeffekte [4]. Der Haupteffect der Pigmente ist der vom Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel abhängige Color-Shift, der durch den physikalischen Effekt der Dünnschichtinterferenz hervorgerufen wird [19, 20]. Ebenfalls können höherer Glanz und Glitzereffekte erreicht werden.

Aus der Umgebung dringt Licht in die Lackschicht ein und wird an den Pigmentgrenzflächen reflektiert oder transmittiert (siehe Abbildung 2.2). Das bis zum Bedruckstoff vordringende Licht wird, wie bei einem Lambert-Reflektor, diffus gestreut. Die direkten Reflexionen an der Lackoberfläche, die zum Glanz beitragen, sind in Abbildung 2.2 nicht dargestellt. Nach der klassischen Definition des Glanzes entsteht dieser ausschließlich aus dem Eindruck dieser Art von Lichtreflexionen [4]. In Gleichung 2.1 wird der Reflexionsgrad  $R$  als Quotient der reflektierten  $I_R$  zur einfallenden  $I_E$  Lichtintensität, von nicht polarisiertem Licht an der in Abbildung 2.2 skizzierten Grenzfläche zwischen Lack und Effektpigment berechnet. Die Herleitung entstammt den Fresnel’schen Gleichungen und gilt für Reflexionen auf nicht metallischen Oberflächen [21, 22, 15]. Vorerst werden die Reflexions- und Transmissionsanteile, die in Abbildung 2.2 mit gestrichelten Linien gekennzeichnet sind, nicht betrachtet.

$$R(\varepsilon_1) = \frac{I_R(\varepsilon_1)}{I_E(\varepsilon_1)} = r_k^2(\varepsilon_1) = \frac{1}{2} \cdot [R_{\parallel} + R_{\perp}] = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\tan^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_1'')}{\tan^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_1'')} + \frac{\sin^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_1'')}{\sin^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_1'')} \right] \quad (2.1)$$

Bei senkrechtem Lichteinfall und kleinen Beleuchtungswinkeln ( $\varepsilon_1 < 30^\circ$ ) kann Gleichung 2.1 zusammen

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL



**Abbildung 2.2:** Lichtreflexion und -brechung bei einem Effektpigment - bestehend aus einem mit Titandioxid ( $TiO_2$ ) beschichteten Glimmerteil - in einer Lackschicht (Brechungsindizes  $\tilde{n}$  nach Hupp [15]). Im Modell werden die gestrichelten Lichtreflexionen und -transmissionen vernachlässigt. Die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu. Die gesamte Pigmentdicke liegt bei Titandioxid-Glimmer Pigmenten zwischen 200 und 500 nm [1].

mit dem Brechungsgesetz (Gleichung 2.2) zu Gleichung 2.3 vereinfacht werden.

$$\tilde{n}_1 \cdot \sin(\varepsilon_1) = \tilde{n}_2 \cdot \sin(\varepsilon_1'') \quad (2.2)$$

$$R(\varepsilon_1) = \left( \frac{\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1}{\tilde{n}_2 + \tilde{n}_1} \right)^2 \quad \text{für } \varepsilon_1 < 30^\circ \quad (2.3)$$

Der Reflexionsgrad  $R$  zwischen Luft ( $\tilde{n}_0 = 1$ ) und Lack ( $\tilde{n}_1 = 1,6$ ) liegt demnach bei 5 %, der zwischen Lack und Titandioxid ( $TiO_2$ ) bei 6,5 %. Der Effekt “Glanz aus der Tiefe”, wie er in der Literatur [15, 23] bezeichnet wird, entsteht durch Mehrfach- und Vielfachreflexionen an und zwischen den  $m$  parallelen Grenzflächen. Der Reflexionskoeffizient  $r_k(m)$  lässt sich in Bezug zu dem der ersten Grenzfläche  $r_k$  durch Gleichung 2.4 darstellen [1]. Diese Reflexionen sind in Abbildung 2.2 in  $I_R$  zusammengefasst.

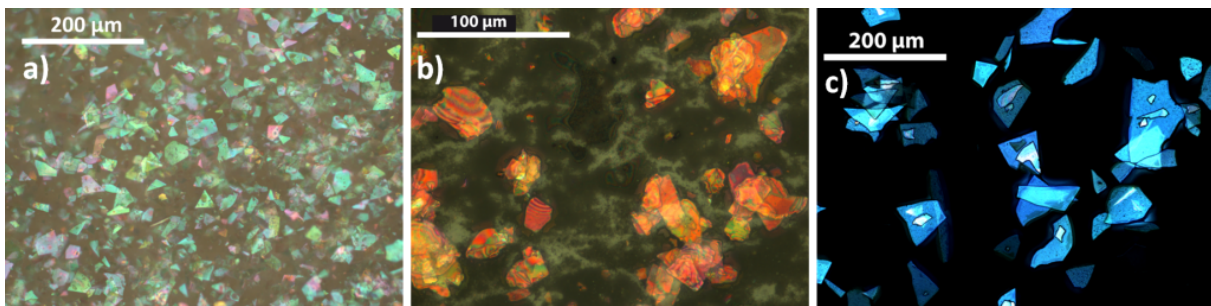
$$r_k(m) = \frac{m \cdot r_k}{1 + (m - 1) \cdot r_k} \quad (2.4)$$

Obwohl mit der Anzahl der Grenzflächen die insgesamt reflektierte Lichtintensität zunimmt, entsteht ein zunehmend diffuser Eindruck, der sich durch abnehmende Helligkeit ausdrückt [1, 15].

Besonders bei gerichteter Beleuchtung ist bei Effektpigmenten ein Glitzer- oder Sparkling-Effekt zu beobachten, der an die Reflexionen kleiner Glassplitter erinnert [17]. Ein Glitzern tritt hauptsächlich bei größeren Pigmenten (mehrere 10 – 100  $\mu m$  Durchmesser) auf und ist bei Metalleffektpigmenten stärker ausgeprägt als bei Interferenzeffektpigmenten. Zur drucktechnischen Applikation werden überwiegend Pigmente mit Durchmessern bis zu 60  $\mu m$  verwendet. Bei größeren Pigmenten entstehen zunehmend Schwierigkeiten beim Verdrucken. Glitzer oder Sparkle entsteht durch die Eigenschaft der Effektpigmente, Licht in verschiedene Richtungen zu reflektieren und ist unmittelbar abhängig von ihrer Teilchengröße, Orientierung und Anzahl. Gleichmäßig parallel zum Substrat orientierte Pigmente lassen demnach kaum Glitzer zu, da sie das Licht in eine Richtung reflektieren [1]. Der Betrachter nimmt das direkt in seine Augen reflektierte Licht als Glitzer wahr. Dieser galt vor einigen Jahren mit Farbmessgeräten als nicht direkt erfassbar [17]. Heutzutage kann die Quantifizierung von Glitzer in Mehrwinkelspektrofotometern integriert sein [24]. Unter diffusem Licht, weisen glitzernde Objekte oftmals eine körnige Erscheinung auf, die mit demselben Gerät detektierbar ist. Die Größenverteilung der verwendeten Effektpigmente ist schwer zu bestimmen. Im Sicherheitsdatenblatt des Herstellers wird beispielsweise für das *Colorstream*<sup>®</sup> Pigment *T10-02 Arctic Fire* eine Korngröße von 5 – 50  $\mu m$  sowie eine mittlere Korngröße von 16 – 23  $\mu m$  angegeben [25]. Spezifikationen [26, 27, 28, 29] der verschiedenen Pigmente von *Merck* sagen aus, dass sich lediglich 80 % der Pigmente innerhalb der genannten Grenzen der Korngrößen befinden. Teilweise werden Intervalle angegeben, in denen sich die D10, D50 und D90 Werte der Pigmentverteilung befinden, die auf Messungen mit Geräten der Firma *Malvern* basieren und die beim *Colorstream*<sup>®</sup> Pigment *T10-02 Arctic*

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

*Fire* nicht mit der Angabe von 80 % der Pigmente innerhalb der Korngrößen übereinstimmt. D10, D50 und D90 bedeutet, dass 10 %, 50 % bzw. 90 % der Pigmente kleiner sind als die dazugehörigen Partikelgrößen. Die Konstruktion einer Verteilungsfunktion für jede Pigmentart ist daher schwierig. Die Verteilungen sind sehr breit und folgen nicht immer einer Normalverteilung. Abbildung 2.3 zeigt Mikroskopaufnahmen verschiedener Pigmenttypen. Es sind stark unterschiedliche Pigmentgrößen und -orientierungen zu erkennen. Ein Glitzern kann demnach bei allen Pigmentarten auftreten. Die Pigmenttypen mit insgesamt kleineren Pigmenten zeigen diesen Effekt jedoch dementsprechend seltener. Die Pigmentdicke liegt bei Glimmerpigmenten (z.B. *Iriodine*<sup>®</sup>) zwischen 300 und 600 nm, bei Pigmenten auf Basis von Siliziumdioxid-Flakes (z.B. die meisten *Colorstream*<sup>®</sup> Pigmente) zwischen 50 und 1000 nm, wobei in der Praxis hauptsächlich Pigmente mit einer Dicke von ca. 400 nm eingesetzt werden, was vergleichbar ist mit der der Glimmerpigmente [20]. Die Dicke der *SiO<sub>2</sub>*-Pigmente kann aufgrund ihrer synthetischen Herstellung besser eingestellt werden als die der natürlichen Glimmerpigmente. Deshalb und wegen ihrer geringeren Brechzahl können mit *SiO<sub>2</sub>*-Pigmenten stärkere Interferenzfarben erzeugt werden [1].



**Abbildung 2.3:** Mikroskopbilder verschiedener Effektpigmente in einem Lack

a: *Colorstream*<sup>®</sup> Pigmente T10-02 Arctic Fire von Merck, Partikelverteilung 80 % im Bereich von 5 – 50 µm [26]; Die für diese Pigmentart typische grüne und rote Farbwirkung ist erkennbar.

b: *Iriodin*<sup>®</sup> Pigmente 7215 Ultra Rot von Merck auf schwarzem Untergrund, Partikelverteilung 80 % im Bereich von 10 – 60 µm [27]; Interferenzeffekte sind ersichtlicher.

c: *Firemist Blue 9G630L* Pigmente von BASF [30], Partikelverteilung 95 % im Bereich von 5 – 300 µm [30]

a-c: Es werden unterschiedliche Pigmentgrößen und -orientierungen deutlich.

Der Interferenzeffekt der Pigmente entsteht durch den Wegunterschied des Lichts beim Durchgang durch die dünnen Titandioxidschichten (*TiO<sub>2</sub>*), die sich auf Glimmer oder Siliziumdioxidpigmenten (*SiO<sub>2</sub>*) befinden. Dabei ist die optische Weglänge ( $\tilde{n} \cdot x$ ), die das Licht innerhalb des Materials zurücklegt von Bedeutung [31]. Um eine für einen Interferenzeffekt nötige Reflexion zu erhalten, muss die Brechzahl der Pigmentbeschichtung ( $\tilde{n}_2$  in Abbildung 2.2) größer als die des Grundpigments ( $\tilde{n}_3$ ) sein [20]. Eine Reflexion an einer Grenzfläche vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium bewirkt einen Phasensprung um eine halbe Wellenlänge, der umgekehrt nicht auftritt. Für die ersten beiden am Pigment reflektierten Lichtstrahlen (durchgezogene Linien) in Abbildung 2.2 gilt folgende Bedingung für eine



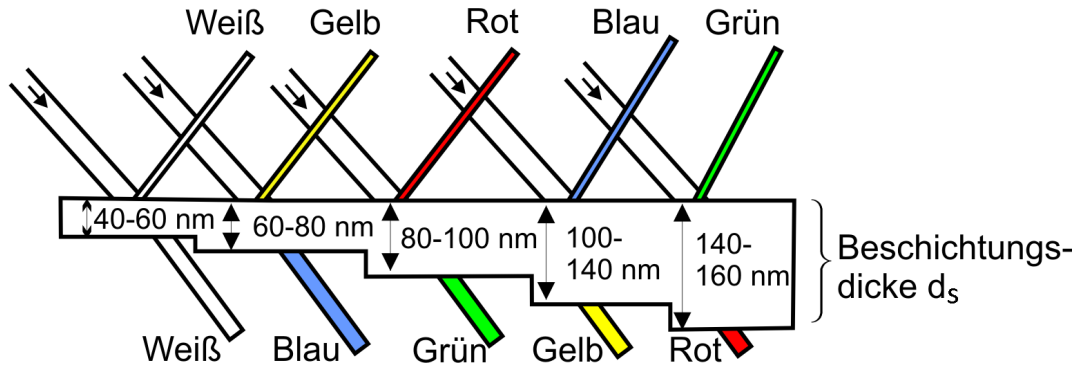
destruktive Interferenz (vergleiche [32]):

$$2 \cdot d_S \cdot \cos \varepsilon_1'' \cdot \tilde{n}_2 = \lambda \cdot i \quad \text{mit } i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

Bei einer konstruktiven Interferenz ist Gleichung 2.6 erfüllt [32].

$$2 \cdot d_S \cdot \cos \varepsilon_1'' \cdot \tilde{n}_2 = (2i + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{mit } i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.6)$$

Für kleine Winkel wird  $\cos \varepsilon_1''$  zu 1 und die Gleichungen 2.5 und 2.6 können vereinfacht werden. Diese gelten bei gleicher Schichtdicke immer für eine Wellenlänge und deren Vielfache, wodurch ein Teil des einfallenden sichtbaren Spektrums abgeschwächt bzw. verstärkt wird [15]. Die maximale Reflexion bewegt sich mit wachsender optischen Weglänge hin zu höheren Wellenlängen [17]. Wird dasselbe Material für die dünnen Schichten ( $\Rightarrow \tilde{n} = \text{const.}$ ) auf den Pigmenten (z.B. Titandioxid:  $\tilde{n} \approx 2,7$ ) verwendet, so lässt sich der Farbeindruck durch die Schichtdicke  $d_S$  einstellen (siehe Abbildung 2.4).



**Abbildung 2.4:** Die Schichtdicke der Titandioxidschicht  $d_S$  bestimmt die Interferenzeffektfarbe des Pigments [15, 33].

Zudem ist der Interferenzeffekt der Effektpigmente abhängig vom Einstrahlwinkel des Lichts. In [34] wird dies durch Gleichung 2.7 erklärt.

$$\lambda_{\max} = \frac{4 \cdot d_S}{2i - 1} \sqrt{\tilde{n}_2^2 - \tilde{n}_1^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_1} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.7)$$

Für größere Einstrahlwinkel  $\varepsilon_1$  wird die Wellenlänge mit maximaler Reflexion kleiner [17]. All diese theoretischen Darstellungen gehen von einer zum Bedruckstoff parallelen Pigmentorientierung aus, die besonders bei dickeren Schichten ( $> 20 \mu m$ ), wie in Abbildung 2.3 ersichtlich, nicht immer vorliegt. Das Erscheinungsbild von Druckprodukten, die mit plättchenförmigen Effektpigmenten bedruckt wurden, wird somit von der Orientierungsverteilungskurve der Pigmente beeinflusst [1]. Allgemein gilt eine zum Bedruckstoff parallele Orientierung der Pigmente als Voraussetzung für optimale Effektwirkungen. Diese wird immer auch dann erzielt, wenn der Festkörper- bzw. Pigmentanteil niedrig ist, da die Filmschrumpfung dann zu einer Pigmentorientierung parallel zur Substratoberfläche führen kann. Verdunstet

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

das Lösemittel jedoch zu langsam, kann die Bildung von Bénard-Zellen eine parallele Pigmentorientierung verhindern (Wolkenbildung durch Nahordnung) [35]. Unterschiedliche Prozessierungstechnologien wirken sich bei Lackierungen auf die Pigmentorientierung aus. Ein wichtiges Forschungsfeld bei Effektpigmenten ist deshalb unter anderem die Verbesserung der optischen Eigenschaften durch eine bessere Pigmentorientierung [20].

Interferenzeffektpigmente in einer Lackschicht sind nahezu transparent und besitzen wie alle gewöhnlichen Druckfarben lasierende Eigenschaften. Das bedeutet, dass in Abhängigkeit von der gedruckten Schichtdicke, der Pigmentierung und der Färbung - gleichmäßige Pigmentverteilung und parallele Pigmentorientierung vorausgesetzt - unterschiedlich viel Licht transmittiert wird [15]. Dieses durchdringt die gedruckte Schicht, wird vom Bedruckstoff reflektiert und verlässt dieselbe nach erneutem Durchwandern. Durch diese absorbierenden Eigenschaften der lasierenden Pigmente entsteht eine subtraktive Farbmischung [36, 37, 38]. Je nach der Farbe des Untergrunds bzw. -drucks ergeben sich dadurch unterschiedliche Farbwirkungen der Effektpigmente. Während ein weißer Bedruckstoff, die transmittierten Lichtstrahlen in Abbildung 2.4 reflektiert, so werden sie bei einem schwarzen Bedruckstoff absorbiert. Letzterer eignet sich somit besonders gut zur visuellen Beurteilung von gedruckten Effektpigmentschichten. Auch bei kleinen Farbschichtdicken ist der Einfluss der Interferenzeffektfarbe deutlich zu sehen [15]. Es werden nur die durch den Interferenzeffekt am Pigment erzeugten Farben wahrgenommen. Unregelmäßige Pigmentverteilungen und inhomogene Schichten können somit leicht identifiziert werden.

Im Folgenden werden die Einsatzbereiche von Effektpigmenten in der Druckindustrie angesprochen.

### 2.1.3 Verwendung in der Druckindustrie

Effektpigmente werden vor allem im Verpackungsbereich immer häufiger zur Veredelung von Druckerzeugnissen eingesetzt, um den gefühlten Wert der Artikel zu steigern und den Kunden vom Kauf eines qualitativ hochwertigen Produkts zu überzeugen.

Laut einer Studie betrachtet eine Person ein Produkt durchschnittlich ca. 0,3 s während des Vorbeigehens im Kaufhaus oder Supermarkt. In dieser Zeit muss die Verpackung sein Interesse erwecken. Forschungen zur Gefallenswirkung von Verpackungen bei Konsumgütern beweisen, dass "schön verpackte" Produkte eine deutlich höhere Zahlungsbereitschaft und Kaufwahrscheinlichkeit gegenüber potenziellen Kunden erzielen als gewöhnliche [6, 42]. Da optische Effekte prädestiniert dafür sind, in kurzer Zeit zu beeindrucken und perlglänzende oder spiegelnde Oberflächen Menschen seit jeher faszinieren [1], eignen sich Effektpigmente bestens für diese Aufgabe. Obwohl der Hauptabsatzmarkt von Effektpigmenten durch deren Verwendung in Automobillacken und Kosmetikprodukten außerhalb der Druckindustrie liegt, so steigt dennoch die wirtschaftliche Bedeutung bei Druckprodukten.

Das Erzeugen einer reproduzierbar homogen gedruckten Schicht mit Effektpigmenten, die  $10^2 - 10^3$  mal größer sind als gewöhnliche Farbpigmente [20], kann generell als eine drucktechnische Herausforderung



**Abbildung 2.5:** Mit Effektpigmenten bedruckte Verpackungen

a: Beispiel einer veredelten Verpackung [39]

b: Exklusive Getränkeverpackung [40]

c: Mit *Iriodinen*® bedruckte Verpackung als Gewinner des EFTA (European Flexographic Technical Association) Print Awards 2008 [41]

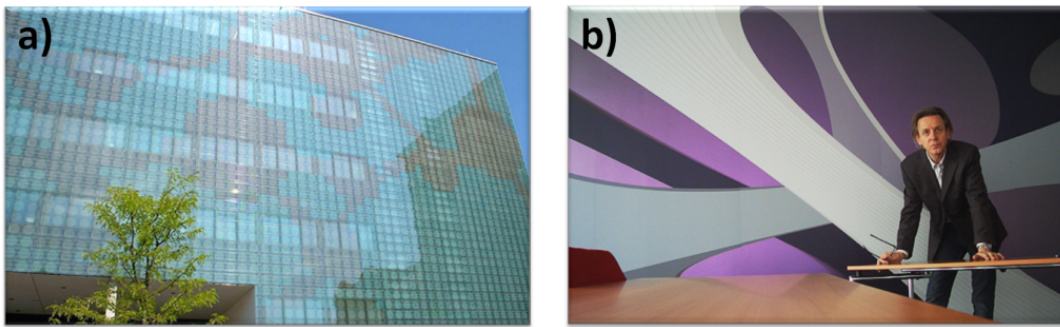
angesehen werden. Die spröden Pigmente können durch die Scher- und Druckkräfte zwischen den Walzen einer Druckmaschine zerbrechen und dadurch die Teilchengrößenverteilung verändern. Das führt zu Glanzverlusten, da die zusätzlich entstandenen Kanten den Anteil des diffus gestreuten Lichts erhöhen [1]. Pigmentbruch kann ebenfalls beim Aufrühren einer länger nicht verwendeten Farbe entstehen. Um dies zu vermeiden und möglichst alle abgesetzten und agglomerierten Pigmente zu vereinzeln, empfehlen die Pigmenthersteller ein “sanftes” Aufrühren von Druckfarben. Während des Druckes ist auf eine ständige Bewegung der Farbsuspension (beispielsweise im Kammerrakel eines Flexodruckwerks) zu achten. Da für jedes Druckverfahren nur Druckfarben innerhalb eines bestimmten Viskositätsbereichs anwendbar sind, führt eine Viskositätssteigerung zur Verlangsamung des Sedimentationsverhaltens der Effektpigmente nur bedingt zum Erfolg. Die Zeit, die vergeht, bis sich Pigmente mit einer Teilchengrößenverteilung zwischen  $5 - 200 \mu\text{m}$  vollständig abgesetzt haben, variiert von Stunden bis Wochen. Generell steigt mit zunehmenden Partikelgrößen die Sedimentationsgeschwindigkeit [1] nach dem Gesetz von Stokes. Für eine parallele Orientierung der Pigmente bei einer drucktechnischen Applikation ist neben der Druckspannung, das Verdunsten des Lösemittels und das damit verbundene Schrumpfen der gedruckten Schicht vorteilhaft. Nachteilig für eine homogen gedruckte Schicht und eine hohe Druckqualität wirken sich lokale Pigmentkonzentrationsunterschiede aus, die unter dem Begriff “Wolkigkeit” bekannt sind und bei Effektpigmenten aufgrund ihrer Geometrie besonders stark auftreten [20]. Für eine hohe Druckqualität ist eine gegenseitige Abstimmung der beteiligten Materialien, Effektpigment, Druckfarbe bzw. -lack und Bedruckstoff notwendig. Oftmals entstehen drucktechnische Probleme durch unzureichende Pigmentbenetzung durch das Bindemittel, was zu Pigmentanhäufungen führt. Während sich Effektpigmente im Flexodruckverfahren auf rauen Bedruckstoffen besser verdrucken lassen, erreichen sie bei allen Druckverfahren auf glatten

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

Oberflächen durch ihre gleichmäßige Orientierung (abgesehen vom Glitzer) bessere Effekte [1]. Es werden hohe Maschinengeschwindigkeiten, kurze Verlaufzeiten und eine parallele Orientierung der Pigmente zum Bedruckstoff für gute Effekte favorisiert. Um optimale Perlglanzeffekte zu erreichen, empfiehlt sich die Verwendung eines hoch transparenten Bindemittelsystems [1]. Die Pigmentkonzentration und Viskosität der Farbe wird für das verwendete Druckverfahren und entsprechend der Maschinenkonfiguration angepasst.

Effektpigmente werden in allen konventionellen Druckverfahren eingesetzt. Der Tiefdruck wird bevorzugt für große Auflagen verwendet und erzeugt trotz hoher Druckgeschwindigkeiten ( $\approx 15 \frac{m}{s}$ ) qualitativ hochwertige Druckprodukte. Effektpigmente werden damit auf Verpackungsmaterialien, Kataloge und Zeitschriften verdruckt [1]. Abbildung 2.6 zeigt neue Anwendungen für Effektpigmente im Großflächen-druck.



**Abbildung 2.6:** Anwendungen von Effektpigmenten im Großflächendruck [43]

a: *Colorstream*® Pigmente auf Glas gedruckt (Fassade der Fakultät für Chemie der Technischen Universität Graz in Österreich)

b: Tapete mit *Colorstream*® Pigmenten bedruckt (bei *Merck* in Darmstadt)

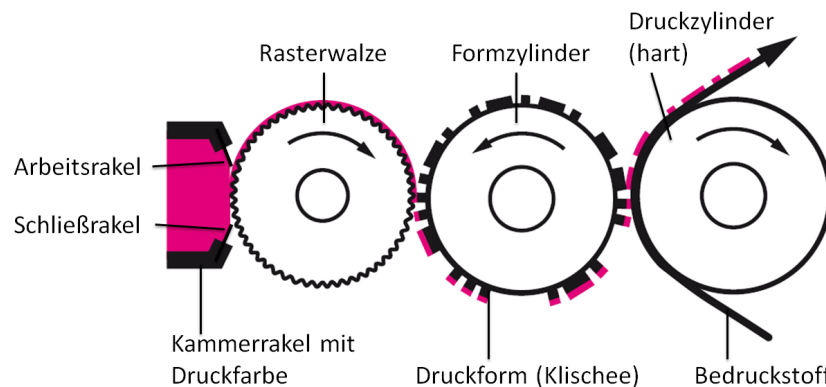
Die Anwendungen im Flexodruck sind vielseitiger und nicht auf hohe Auflagen beschränkt. Auf dieses Druckverfahren wird im folgenden Abschnitt genauer eingegangen. Im Siebdruck kommt die Wirkung der Effektpigmente aufgrund der höheren Schichtdicken am besten zum Tragen. Auf unterschiedlichsten Bedruckstoffen, die von Papier über Textilien bis zu Keramik reichen, können so gut wie alle Pigmentgrößen und -arten verdruckt werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die maximale Pigmentgröße das 0,67-fache der Maschenweite des Siebes nicht überschreitet [44]. Der Siebdruck eignet sich hervorragend zur Erzeugung außergewöhnlicher Druckeffekte, in die das Musterbuch “Be EFFECTive” [45] einen Einblick liefert. Aufgrund der geringen Schichtdicken ( $\approx 1 \mu m$ ) und mehrfachen Farbspaltung im Walzenstuhl können im Offsetdruck nur Pigmente geringer Größe (Durchmesser  $5 - 25 \mu m$ ) appliziert werden. Der Einsatz von Effektpigmenten in dem weiterhin an Bedeutung gewinnenden Inkjet-Druckverfahren ist aufgrund der Pigmentgrößen nicht möglich. Empfehlungen für das Verdrucken von Effektpigmenten stellt *Merck* in [44, 46, 47, 48, 49] zur Verfügung.

## 2.2 Flexodruck

Der Flexodruck gehört zu den konventionellen Druckverfahren, bei denen Farbe über eine Druckform durch Druckspannung auf den Bedruckstoff übertragen wird. Er ist der wichtigste und heutzutage einzige wirtschaftlich bedeutende Vertreter der Hochdruckverfahren, zählt zu den wichtigsten Druckverfahren für das Bedrucken von Verpackungen [11] und unterscheidet sich vom Buchdruck hauptsächlich durch seine viskoelastische Druckform [50]. Seine Vorteile liegen vor allem in der Verarbeitung verschiedenster Bedruckstoffe (Papier, Folie, Faserstoffe) und Farbsysteme (Wasser-, Lösemittel- oder UV-Farben), der Möglichkeit hohe Farbmengen zu übertragen und in seinem einfachen Gesamtsystem, das eine universelle Einsetzbarkeit begünstigt. Im Folgenden sind die Grundlagen des Verfahrens, verwendete Farben und Bedruckstoffe dargestellt. Auf den Einsatz des Flexodrucks als Lackierwerk wird ebenfalls eingegangen.

### 2.2.1 Grundlegendes zum Flexodruck

Als direktes Hochdruckverfahren sind beim Flexodruck die druckenden Elemente der Druckform (auch Klischee genannt) erhaben und die Druckfarbe wird direkt davon auf den Bedruckstoff übertragen. Die bildgebenden Elemente sind bei allen direkten Druckverfahren deshalb bezogen auf den Ausdruck spiegelverkehrt auf der Druckform angeordnet. Ein Schema eines Flexodruckwerks zeigt Abbildung 2.7.



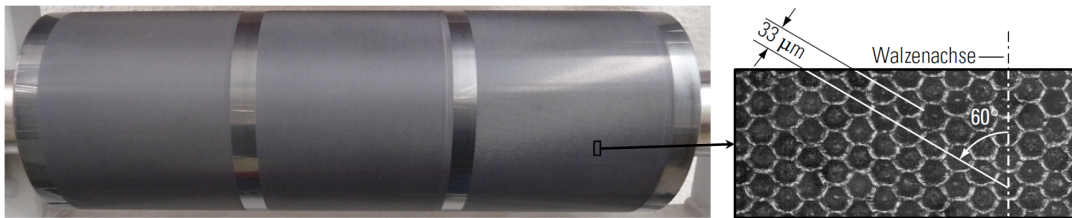
**Abbildung 2.7:** Schema eines Flexodruckwerks. Die Farbübertragung erfolgt vom Kammerrakel über eine Rasterwalze auf die Druckform und gelangt von dort direkt auf den Bedruckstoff ([51] ergänzt).

Der Formzylinder wird im Flexodruck auch Klischeezylinder genannt und der Druckzylinder ebenfalls als Gegendruckzylinder bezeichnet. Die Farbe befindet sich üblicherweise in einem Kammerrakelsystem, das aus einer Farbkammer und einer Arbeits- und Schließrakel besteht, wird von dort auf eine Rasterwalze, anschließend auf die Druckform und den Bedruckstoff übertragen.

Heutzutage werden überwiegend lasergravierte Keramikrasterwalzen eingesetzt, die gegenüber den mechanisch gravierten Chromrasterwalzen eine längere Lebensdauer aufweisen und sich auch durch ihre sehr gute Langzeitstabilität im Druckprozess durchgesetzt haben [11]. Die wichtigste Aufgabe der Rasterwalze

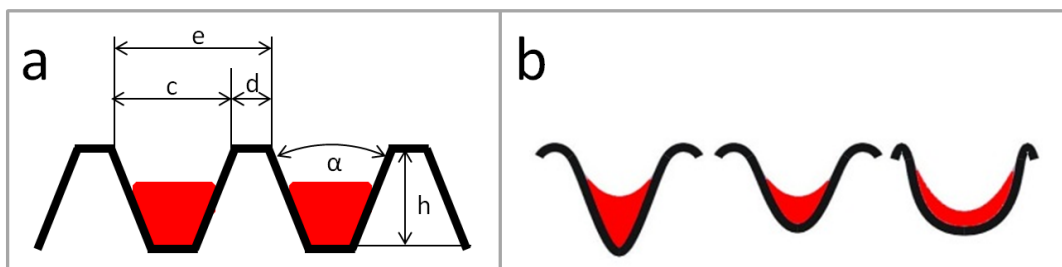
## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

ist die Farbdosierung. Die Druckfarbe wird bei einem Kammerrakelsystem durch Anspülung in die Vertiefungen der Rasterwalze aufgenommen und überschüssige Farbe durch die Rakel abgestreift [11]. Als Maß für die Menge der Farbübertragung dient das vom Hersteller in einem Prüfprotokoll angegebene theoretische Schöpfvolumen der Rasterwalze. Es beschreibt das Fluidvolumen, das die Rasterwalze theoretisch transportieren kann, falls alle Vertiefungen bis zum Rand mit Farbe gefüllt sind. Besitzt eine Rasterwalze über die Druckbreite zwei oder mehr Bereiche mit Näpfchen unterschiedlicher theoretischer Schöpfvolumina, so wird diese als Bänderwalze bezeichnet. Die Gravurart dieser Bereiche ist normalerweise dieselbe. Abbildung 2.8 zeigt eine Bänderwalze und verdeutlicht den Gravurwinkel und die Rasterteilung ( $33\text{ }\mu\text{m}$ ) der Näpfchen.



**Abbildung 2.8:** Bänderwalze. Die einzelnen Bänder mit unterschiedlichen Schöpfvolumina sind durch einen ungravierten Bereich getrennt, um einen Farbtransport in Achsrichtung zu verhindern. Vergrößert ist der Gravurwinkel ( $60^\circ$ ) und die Rasterteilung ( $33\text{ }\mu\text{m}$ ) dargestellt [52].

Weitere Begriffe zur Näpfchengeometrie sind in Abbildung 2.9 veranschaulicht. Die Lineatur oder Rasterweite (Einheit  $\frac{\text{Linien}}{\text{cm}}$ ) einer Rasterwalze ergibt sich aus dem reziproken Wert ihrer Rasterteilung ( $e$ ) angegeben in  $\text{cm}$ . Alle Größen haben einen Einfluss auf die Farbübertragung.

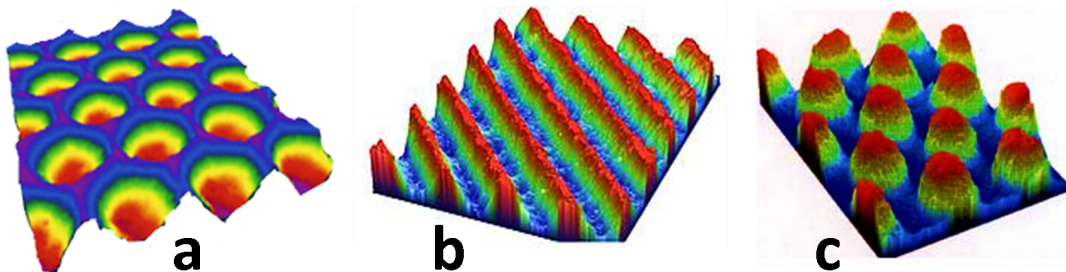


**Abbildung 2.9:** Näpfchengeometrien

a:  $c$  Näpfchenweite,  $d$  Stegbreite,  $e$  Rasterteilung,  $\frac{d}{e}$  Stegverhältnis,  $\alpha$  Öffnungswinkel,  $h$  Näpfchentiefe [53]  
b: Lasergravierte Näpfchen unterschiedlicher Geometrie [54]. Das Entleerungsverhalten wird entscheidend durch die Näpfchengeometrie beeinflusst. In den Näpfchen sind Farbückstände nach der Farbübertragung eingezeichnet. Im Gegensatz zu den in a gezeigten mechanisch gravierten Näpfchen, die die Form einer Stumpfpypyramide aufweisen, besitzen lasergravierte Näpfchen eine Kalottenform.

Die am weitesten verbreitete Gravurart bei Rasterwalzen ist die Näpfchengravur. Ebenfalls werden häufig liniengravierte Rasterwalzen (Haschuren) verwendet. Die ART<sup>TM</sup>- oder H.I.T.-Gravuren eignen sich durch

die Form ihrer Stützstrukturen besonders zum Verdrucken hoher Schichtdicken und zeigen ein besseres Leerungs- und Reinigungsverhalten. Abbildung 2.10 zeigt Aufnahmen der genannten Gravurarten.



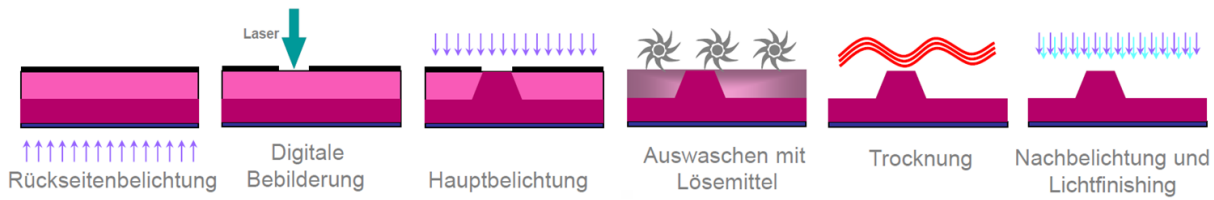
**Abbildung 2.10:** Gravurarten bei Keramikrasterwalzen. a: Näpfchengravur, b: Liniengravur (Haschuren), c: H.I.T.-60°-Gravur (Quellen: *Harper*<sup>®</sup> und *Zecher*)

Abhängig von dem Stegverhältnis, dem Öffnungswinkel der Näpfchen, der Lineatur (Rasterweite), der Gravurart und der Näpfchentiefe übertragen Rasterwalzen unterschiedliche Farbmengen trotz zum Teil gleicher theoretischer Schöpfvolumina. Damit hat die Rasterwalze einen zentralen Einfluss auf das qualitative Druckergebnis. Die Messmethoden zur Bestimmung des theoretischen Schöpfvolumens unterscheiden sich ebenfalls von Hersteller zu Hersteller, wodurch die Messwerte oft stark streuen. Laut Erfahrungen der Firma *Zecher* werden je nach Berücksichtigung oben genannter Einflüsse ca. 25 – 40% des theoretischen Schöpfvolumens auf den Bedruckstoff übertragen. Die Firma stellt zur Vorausberechnung der übertragenden Farbschicht Tabellen bzw. ein Software zur Verfügung. Die tatsächlich aufgetragenen Farbmengen können jedoch exakt nur nachträglich bestimmt werden.

Bei der Farbübertragung spielt auch die Druckform eine große Rolle. Sie besteht aus Gummi oder Fotopolymeren und wird mit Klebstoff oder doppelseitigem Klebeband auf den Formzylinder aufgebracht [52]. Bereits in zylindrischer Form hergestellte Druckformen (Sleeves) sind aufgrund ihrer genauen Positionierbarkeit und schnellen Austauschbarkeit ebenfalls weit verbreitet. Am häufigsten werden Fotopolymerplatten als Druckform verwendet. Die Ausbildung der bildgebenden Elemente erfolgt hierbei durch eine Polymerisation mittels UV-Strahlung. Es wird die konventionelle Filmbelichtung und die digitale Belichtung (Computer to Plate Technologie) unterschieden. Letztere ist in Abbildung 2.11 dargestellt und setzt sich zunehmend gegenüber der konventionellen Methode durch, da die Filmherstellung entfällt.

Die Dicke und Härte der Druckform wird an den Bedruckstoff und die Art der Bildelemente angepasst. Gleiches gilt für das üblicherweise verwendete doppelseitige Klebeband (Unterbau), das zur Befestigung der Druckform auf dem Formzylinder verwendet wird. Das Zusammenspiel von Druckform und Unterbau beeinflussen die Druckqualität entscheidend, da sie den überwiegenden Teil der Druckkräfte aufnehmen, was zu einer Verformung der bildgebenden Elemente führen kann. Beim Drucken mit unterschiedlichen

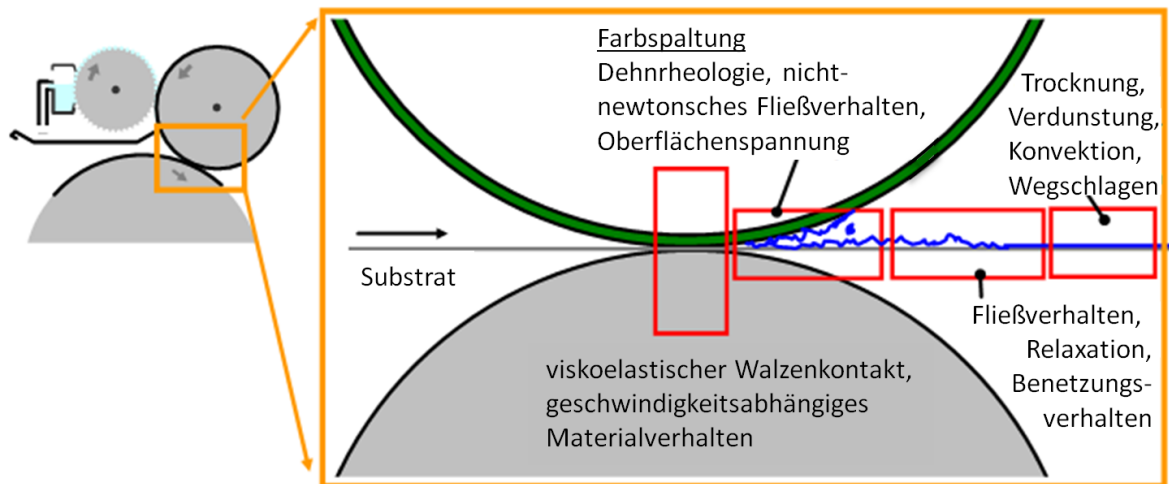
## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL



**Abbildung 2.11:** Ablauf der digitalen Druckformherstellung. Anstatt eines Films bei der konventionellen Methode übernimmt ein Laser die Bebilderung der Druckform (DuPont de Nemours GmbH und [50]).

Tonwerten (Rasterung der bildgebenden Elemente der Druckform, siehe Abbildung 4.4) ist die Rasterweite der Druckform mit der der Rasterwalze abzustimmen, um eine stabile Druckqualität zu erreichen. Mit Tonwert ist in dieser Arbeit immer der theoretische bzw. nominelle Tonwert der Druckform gemeint. In der Praxis wird dieser auch als Halbton oder Halbtonfläche bezeichnet. Für das Verdrucken von Effektpigmenten werden für eine optimale Übertragung der Pigmentteilchen auf den Bedruckstoff weiche Fotopolymerplatten und lasergravierte Keramikrasterwalzen mit einem Stegverhältnis  $< \frac{1}{5}$  empfohlen [1].

Die Druckkräfte zwischen der Druckform und dem Bedruckstoff sind beim Flexodruck vergleichsweise gering. Auf die Farbübertragung und Farbschichtausbildung haben zudem die in Abbildung 2.12 beschriebenen physikalischen Effekte einen Einfluss.



**Abbildung 2.12:** Schema eines Flexodruckwerks. Unterschiedlichste physikalische Effekte beeinflussen die Ausbildung des gedruckten Films (Quelle: J. Neumann, IDD).

Die physikalischen Effekte beziehen sich auf die Vorgänge während und nach dem Druckspalt bei der Farbübertragung von der Druckform auf den Bedruckstoff (Substrat). Diese Phänomene sind sehr komplex und werden in anderen wissenschaftlichen Arbeiten am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren

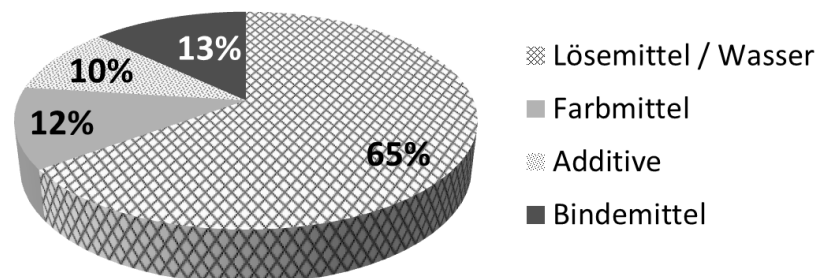


untersucht (vgl. [55, 51]). In dieser Arbeit werden ausschließlich die Auswirkungen des Substrats, der Druckgeschwindigkeit und der Trocknungsbedingungen auf die von Interferenzeffektpigmenten hervorgerufenen Effekte betrachtet.

Im Folgenden wird auf die im Flexodruck verwendeten Druckfarben und Bedruckstoffe eingegangen. Die Trocknung der Druckfarbe wird in den Kapiteln 5 und 6 genauer betrachtet.

### 2.2.2 Flexodruckfarben

Für das Flexodruckverfahren werden lösemittel-, wasserbasierte und strahlenhärtende UV-Farben und Lacke eingesetzt. Die Farben werden dadurch nach der Art ihrer Trocknung beim Übergang von der flüssigen Phase zu einer auf dem Bedruckstoff haftenden Schicht eingeteilt. Physikalisch trocknende Farben, wie die lösemittel- und wasserbasierten, bestehen aus vier Hauptbestandteilen, deren Anteile in Abbildung 2.13 dargestellt sind. Sie trocknen durch das Verdampfen des jeweiligen Lösemittels oder schlagen in den Bedruckstoff weg. Unter Einsatz von Heißlufttrocknern oder IR-Strahlern trocknen Lacke dabei innerhalb einer Sekunde [56], wobei sich die aufgetragene Nassschichtdicke stark verringert. Den größten Anteil hat bei den Flexodruckfarben das Lösemittel. Additive, das Binde- und Farbmittel liegen bei Mengenanteilen um die 10%. Nach Angaben von *Sun Chemical* fallen die Additivanteile mit 3% deutlich geringer und die Bindemittelanteile mit 20% dementsprechend höher aus [57].



**Abbildung 2.13:** Zusammensetzung lösemittel- und wasserbasierter Flexodruckfarben (Daten aus [11])

Strahlenhärtende Farben und Lacke trocknen in Bruchteilen einer Sekunde durch eine Polymerisationsreaktion (chemische Trocknung), die durch UV-Strahlung initiiert wird. Sie können weiter in radikalisch und kationisch härtende Farbsysteme eingeteilt werden, bestehen mehrheitlich aus Monomeren und Oligomeren und unterscheiden sich dadurch in ihren Bestandteilen deutlich von lösemittel- und wasserbasierten Farben. Der Schrumpf der Schichtdicke während der Trocknung bewegt sich bei UV-Farben je nach Zusammensetzung zwischen 3 und 20%, was gegenüber lösemittel- und wasserbasierten Farben gering ist. Bei Lacken fehlt das Farbmittel. Eine Einteilung erfolgt in Dispersions-, Lösemittel und UV-Lacke. Dispersionslacke sind wasserbasiert und bestehen hauptsächlich aus Polymerdispersionen, in Wasser gelösten Harzen und Wachsen, Filmbildungshilfen, Netzmitteln und Entschäumern [52]. Lacke werden zum

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

Schutz der darunterliegenden Schichten verwendet oder bewirken einen optischen Effekt. Zum Verdrucken von Interferenzeffektpigmenten werden dieselben entweder in Lacke oder Farben eingemischt, wobei bei letzteren ihre Wirkung durch das Farbmittel eingeschränkt ist.

### 2.2.3 Bedruckstoffe

Der Flexodruck ist im industriellen Bereich das flexibelste Druckverfahren und für alle Bedruckstoffe einsetzbar. Ausschlaggebend dafür ist vor allem die viskoelastische Druckform, die sich dem Bedruckstoff anpassen kann und so auch auf relativ rauen Oberflächen gute Druckergebnisse hervorbringt [11]. Im Flexodruck verwendete Bedruckstoffe sind

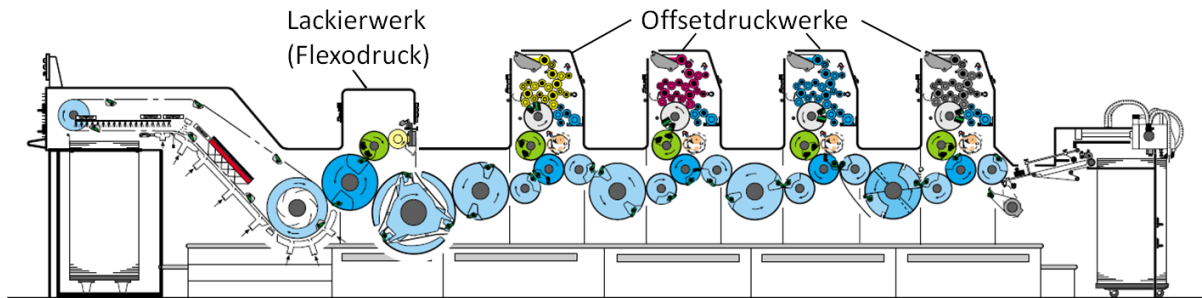
- Faserstoffe - Papier, Karton, Voll- und Wellpappe,
- Kunststoff-, Verbund- und Metallfolien,
- Etiketten- und Verbundmaterialien.

Der Verpackungsdruck ist der Haupteinsatzbereich des Flexodrucks. Mit etwa der Hälfte aller Verpackungen stehen dabei die Faserstoffe an erster Stelle. Wertmäßig haben sie diese Position bereits vor einigen Jahren an die Kunststoffmaterialien abgegeben, von denen in Europa ungefähr die Hälfte im Flexodruckverfahren bedruckt werden [11]. Die Preise der Bedruckstoffe unterscheiden sich dabei enorm und sind in den letzten Jahren aufgrund steigender Energie- und Rohstoffkosten stetig gestiegen. Liegt der Quadratmeterpreis bei Papier noch im einstelligen Cent-Bereich, so wird die Ein-Euro-Marke bei Folien sehr leicht überschritten.

### 2.2.4 Lackierwerk zur Veredelung im Offsetdruck

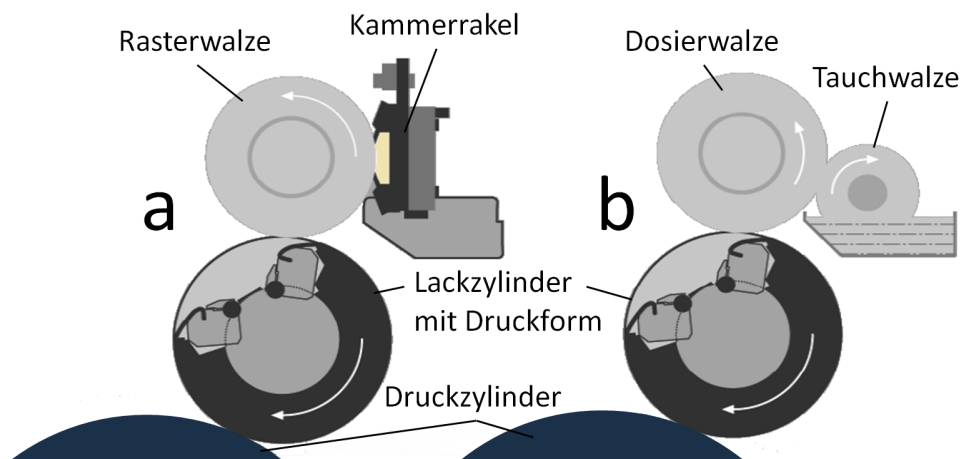
Flexodruckmaschinen gibt es in verschiedensten Ausführungen, die dem jeweiligen Einsatzbereich angepasst sind. Sie lassen sich in die zwei Hauptgruppen der Mehrzylinder- und Zentralzylinderdruckmaschinen einteilen [11]. Bei ersteren werden Druckmaschinen in Kompakt- oder Reihenbauweise unterschieden. Die Reihenbauweise wird im Schmalbahnbereich angewendet, wobei bei modularen Maschinenkonzepten und Lackierwerken in Bogenoffsetdruckmaschinen teilweise lediglich ein einzelnes Flexodruckwerk zur Produktveredelung eingesetzt wird. Eine modulare Rollendruckmaschine mit Flexodruckwerk, die am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren zur industrienahen Produktion zur Verfügung steht, wird in Kapitel 5.2.3 detailliert vorgestellt. Die Veredelung von Druckprodukten im Lackierwerk einer Bogenoffsetdruckmaschine ist im Verpackungsdruck von großer Bedeutung. Verfahrenstechnisch entspricht dieses Lackierwerk dem Prinzip eines Flexodruckwerks und ist daher anwendungstechnisch für *Heidelberger Druckmaschinen* als unser Projektpartner und Weltmarktführer bei der Herstellung von Bogenoffsetdruckmaschinen von größter Bedeutung. Die Kombination konventioneller Druckverfahren ist bei

Druckmaschinen unter dem Begriff Hybrid-Systeme [52] bekannt. Abbildung 2.14 zeigt eine Vierfarben-Bogenoffsetdruckmaschine mit zusätzlichem Lackierwerk als Hybrid-Drucksystem durch die Kombination von Offset- und Flexodruck.



**Abbildung 2.14:** Vierfarben-Bogenoffsetdruckmaschine mit zusätzlichem Lackierwerk als Hybrid-Drucksystem durch die Kombination von Offset- und Flexodruck ([52] ergänzt). Der Bogentransport erfolgt von rechts nach links.

Aufgrund der wirtschaftlichen Vorteile des Druckens und Lackierens in einem Arbeitsgang werden immer mehr Bogenoffsetdruckmaschinen mit einem Lackiersystem (ein oder mehrere Flexodruckwerke) ausgestattet [58]. Dabei kommen für das Flexodruckverfahren ein Kammerrakel- oder Zweiwalzensystem zur Farbübertragung auf die Druckform bzw. Lackplatte zum Einsatz, die in Abbildung 2.15 dargestellt sind.



**Abbildung 2.15:** Mögliche Konfigurationen eines Lackierwerks a: Kammerrakelsystem. Die Farbübertragung erfolgt aus einem Kammerrakel heraus über eine Rasterwalze (vgl. Abbildung 2.7) b: Zweiwalzensystem. Die Farbübertragung erfolgt über eine gummibeschichtete Tauch- und Dosierwalze. Auf dem Lackzylinder ist die Druckform befestigt ([58] geändert).

Lackier- oder Flexodruckwerke werden sowohl nach (siehe Abbildung 2.14) als auch vor den Offsetdruckwerken eingesetzt. In sogenannten “Duo”-Konfigurationen werden bei der Produktion hochwertiger Ver-

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

packungen beispielsweise Effektpigmente in Lackierwerken sowohl vor als auch nach einem Farbdruk im Offset appliziert. Findet der Einsatz von Effektpigmenten ausschließlich vor den Offsetdruckverfahren statt, so werden die durch die Pigmente hervorgerufenen Effekte stark abgeschwächt. Dies wird dennoch in Kauf genommen, da dadurch ebenfalls die beim Verdrucken von Effektpigmenten in Lackierwerken entstehenden Inhomogenitäten im Druckbild unauffällig werden. Da die Wirkung von Interferenzeffektpigmenten, wie in Kapitel 2.1.2 erklärt, auf dunklen Untergründen durch deren hohe Lichtabsorption besonders gut sichtbar ist, treten dabei auch die Inhomogenitäten besonders stark in Erscheinung. Um dies zu vermeiden, werden die lasierenden Effektpigmente überdruckt, oder nur auf hellen Untergründen angewendet, was deren Effektwirkung deutlich verschlechtert. Um ein effektives und wirtschaftliches Verdrucken der teuren Pigmente zu erreichen, müssen die Effekte besser ausgenutzt werden. Ein homogenes Druckbild ist eine Voraussetzung dafür. Deshalb ist es ein weiteres Ziel dieser Arbeit, drucktechnische Einstellungen und geeignete Materialkombinationen zu finden, die dies ermöglichen.

### 2.3 Qualitäts- und Prozesskontrolle in der Druckindustrie

Der Vorteil der Drucktechnik gegenüber anderen Beschichtungsverfahren liegt in der strukturierten, registerhaltigen, kostengünstigen und reproduzierbaren Applikation von Fluiden in einer Massenfertigung. Moderne Druckverfahren sind in der Lage bei Druckgeschwindigkeiten von bis zu  $15 \frac{m}{s}$  ( $\hat{=}$   $54 \frac{km}{h}$ ) Druckpunkte im Mehrfarbdruk mit einer Toleranz von  $\pm 20 \mu m$  genau auf den Bedruckstoff zu applizieren. Für eine hohe Qualität von Druckprodukten ist eine langzeitstabile Reproduktion von Vorlagen von Bedeutung [15]. Dabei spielt neben den Qualitätsmerkmalen, wie der Auflösung, der Position der Rasterpunkte bzw. der Druckbilder, der Oberflächenbeschaffenheit und der gedruckten Schichtdicke, die Farbwirkung eine essentielle Rolle [52].

#### 2.3.1 Möglichkeiten der Durchführung von Qualitäts- und Prozesskontrollen

Um eine konstante Druckqualität gewährleisten zu können, werden bei Bogendruckmaschinen von Zeit zu Zeit stichprobenartig Druckbogen entnommen und außerhalb der Druckmaschine (offline) hinsichtlich ihrer Farbdichte (indirekte Schichtdickenmessung, siehe Kapitel 2.3.2) vermessen. Die Messgeräte liefern eine direkte Rückmeldung an die Druckmaschine, die beispielsweise eine Farbschichtdickenanpassung selbstständig durchführt. Bis die letztendlich bei den neu gedruckten Bogen zum Tragen kommt, verstreichen weitere Sekunden. Damit wird ein sehr träger Regelkreis mit einer relativ langen Totzeit erreicht. Um die Regelzeit deutlich zu verkürzen und damit mögliche Makulatur stark zu verringern werden immer häufiger Inline-Systeme eingesetzt [59, 60], auf die in Kapitel 2.3.6 vertieft eingegangen wird.

Bei Rollendruckmaschinen erfolgt eine Farbkontrolle meist noch visuell zusammen mit dem Kunden unter

der in der Druckindustrie üblichen Beleuchtung mit Normlicht D50. Nach der Einstellung der Druckmaschine und dem Andrucken, wird dazu ein Nutzen aus der Papierbahn herausgeschnitten und zusammen mit der Vorlage des Kunden abgemustert. Farbanpassungen werden vom Drucker direkt aufgrund seiner Erfahrung durch Veränderungen der Druckmaschineneinstellungen vorgenommen. Dieser Vorgang wiederholt sich gegebenenfalls mehrmals, bis der Kunde zufrieden ist und die Produktion freigibt. Inline-Kamerasysteme zur Qualitäts- und Prozesskontrolle sind bei Rollenmaschinen jedoch relativ neu und noch wenig verbreitet.

Druckfehler und die Position der Druckbilder können sowohl bei Bogen- als auch bei Rollenmaschinen inline durch kamerabasierte Druckinspektionssysteme erkannt werden. Liegt das Druckbild außerhalb der Toleranz (unzureichende Registerhaltigkeit) oder wiederholen sich dieselben Druckfehler, so erscheint eine Fehlermeldung oder die Druckmaschine stoppt automatisch, um die Produktion von Makulatur zu vermeiden.

Im Folgenden wird auf die Arbeitsweise von Messgeräten zur Farbdichte-, Farb- und Glanzmessung eingegangen, Möglichkeiten zur Messung von Veredelungseffekten werden aufgezeigt und der aktuelle Trend zur Inline-Messung wird angesprochen.

### 2.3.2 Farbdichtemessung

Eine große Bedeutung in der Prozesskontrolle von Druckprodukten hat die Farbdichtemessung. Farbdichtewerte werden in der Drucktechnik als indirekte Mess- und Regelgrößen für die applizierte Farbmenge verwendet. Mithilfe der Farbdichte können gedruckte Farbschichtdicken durch eine Relation abgeschätzt werden [61]. Die Farbdichtemessung basiert auf dem Lambert-Beerschen Absorptionsgesetz (Gleichung 2.8), das die Änderung der Lichtintensität  $I$  in Abhängigkeit der Dicke  $d$  und des Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  eines Stoffes beschreibt. Letzterer hängt von der Wellenlänge des Lichts und der chemischen Natur des Stoffes ab [32].

$$I = I_E \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

Aufgrund der lasierenden Eigenschaft von Druckfarben ist deren Schichtdicke direkt für den Farbeindruck verantwortlich, sie absorbiert daher je nach Farbe mehr oder weniger Licht bestimmter Wellenlängen. Da in der grundlegenden Farbmetriknorm DIN 5033 [62] für den Begriff des Reflexionsgrades neun verschiedene Begriffe auftauchen [63], wird neben dem in Kapitel 2.1.2 verwendeten Reflexionsgrad  $R$ , der bei der Farbdichtemessung übliche Strahldichtefaktor  $\beta$  verwendet. Er beschreibt das Verhältnis aus reflektierter zu einfallender Lichtintensität bei der in Abbildung 2.16 dargestellten Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie. Das Minimum des Strahldichtefaktors  $\beta_{min}$  wird für die Definition der optischen Dichte verwendet (Gleichung 2.9). Die optische Dichte wird nach der Norm innerhalb eines schmalen Wellenlängenbereichs gemessen, wo der Strahldichtefaktor minimal ist, da hier das meiste Licht absorbiert wurde.

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

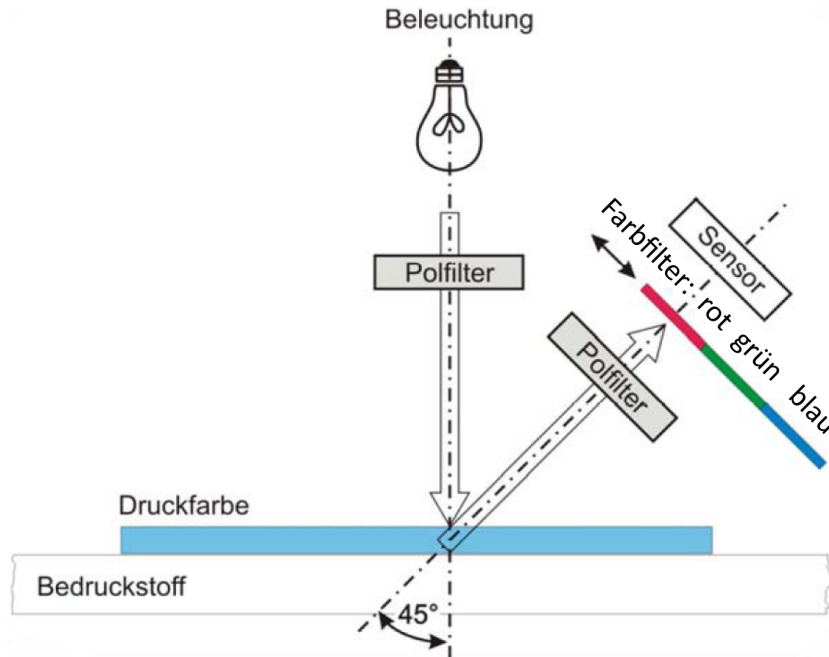
Die optische Dichte wird maximal.

$$D_{opt} = -\lg(\beta_{min}) \quad (2.9)$$

Da der Bedruckstoff einen entscheidenden Einfluss auf die Reflexion des Lichts hat, sind Messungen der optischen Dichte relativ zum Bedruckstoff üblich. Die nach Gleichung 2.10 gemessene relative optische Dichte  $D_{rel}$  wird in der Praxis als Farbdichte  $D$  bezeichnet.  $D_c$  steht für die optische Dichte der Farbe (Color),  $D_s$  für die des Bedruckstoffs (Substrat).

$$D = D_{rel} = D_c - D_s = -\lg\left(\frac{\beta_{min,c}}{\beta_{min,s}}\right) \quad (2.10)$$

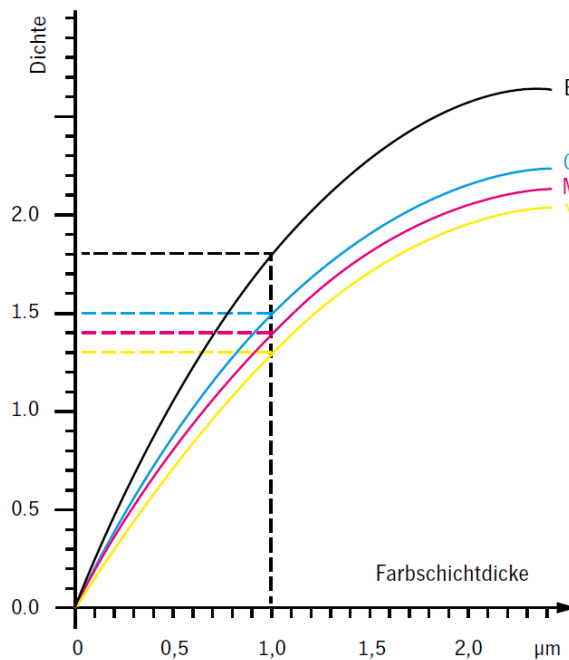
Die Messung der Farbdichte erfolgt nach DIN 16536 [64]. Ein Messgerät, das nach dieser Norm arbeitet heißt Densitometer. In Abbildung 2.16 ist der Messaufbau zur Farbdichtemessung skizziert. Die gegen-



**Abbildung 2.16:** Prinzipieller Aufbau eines Densitometers. Die Beleuchtung der Druckprobe erfolgt mit linear polarisiertem Normlicht A im Winkel von 0°. Der Sensor detektiert die durch den - im Bezug zum ersten um 90° gedrehten - Polfilter und Farbfilter gelangte Reflexion des Lichts ([38] ergänzt). Eine Referenzmessung auf dem Bedruckstoff erfolgt mit demselben Farbfilter im Voraus.

seitig um 90° gedrehten linearen Polarisationsfilter dienen zur Kompensation des direkt an der Farboberfläche reflektierten Lichts. Dieses soll nicht gemessen werden. Licht (Normlicht A) trifft senkrecht auf die Farbschicht, dringt in diese ein, wird vom Bedruckstoff reflektiert, gestreut und erreicht nach erneutem Durchwandern der Schicht einen schmalbandigen Farbfilter. Dieser wird entsprechend der gedruckten Farbe gewählt und entspricht ihrer Gegenfarbe. Wird beispielsweise die Farbe Cyan verdruckt, so werden je nach der Farbschichtdicke die anderen Wellenlängen mehr oder weniger von der Farbe absorbiert. Es

wird ein roter Farbfilter gewählt, da dieser die Intensität des durch die Farbschicht absorbierten Lichts bestmöglich darstellt. Abbildung 2.17 zeigt den Zusammenhang zwischen der gedruckten Farbschichtdicke und der gemessenen Farbdichte für die Skalenfarben Cyan (C), Magenta (M), Gelb (Y=Yellow) und Schwarz (B). Es ist erkennbar, dass die Kurven abhängig von der Farbe unterschiedlich sind und innerhalb des Bereichs von  $0 - 1 \mu\text{m}$  annähernd linear verlaufen.



**Abbildung 2.17:** Zusammenhang der Farbdichte  $D$  und der Farbschichtdicke  $d$  für verschiedene Skalenfarben. Abhängig von der Druckfarbe führt dieselbe Schichtdicke zu unterschiedlichen Farbdichtewerten [61, 52, 38].

Die Farbdichtemessung wird hauptsächlich für im Offsetdruckverfahren hergestellte Druckprodukte verwendet und ist in den Prozessstandard Offsetdruck (PSO) [12] integriert. Damit kann ein vergleichbar hohes Qualitätsniveau der Druckprodukte unabhängig vom Produktionsort gewährleistet werden [38]. Diese indirekte Methode der Schichtdickenmessung wird deshalb verwendet, da es nicht möglich ist gedruckte Schichten einer Dicke um  $1 \mu\text{m}$  messtechnisch direkt in der Druckmaschine zu erfassen. Auch außerhalb ist eine Farbschichtdickenmessung mit einem Weißlichtinterferometer oder einem Konfokalmikroskop gerade bei Papier sehr schwierig, da im Regelfall die Papierrauheit die gedruckte Schichtdicke übersteigt (siehe Abbildung 2.18). Bei höheren Farbschichtdicken ist die Farbdichtemessung zur Abschätzung gedruckter Farbschichtdicken ungeeignet, da sich die Farbdichtewerte nicht mehr linear dazu verhalten, wodurch die Farbdichtemessung praktisch auf das Offsetdruckverfahren beschränkt wird.

Hupp [15] hat gezeigt, dass sich die Farbdichtemessung nicht zur Prozesskontrolle gedruckter Effektpigmentschichten eignet. Es konnte kein Bezug zu den gedruckten Schichtdicken festgestellt werden. Ein Ein-

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

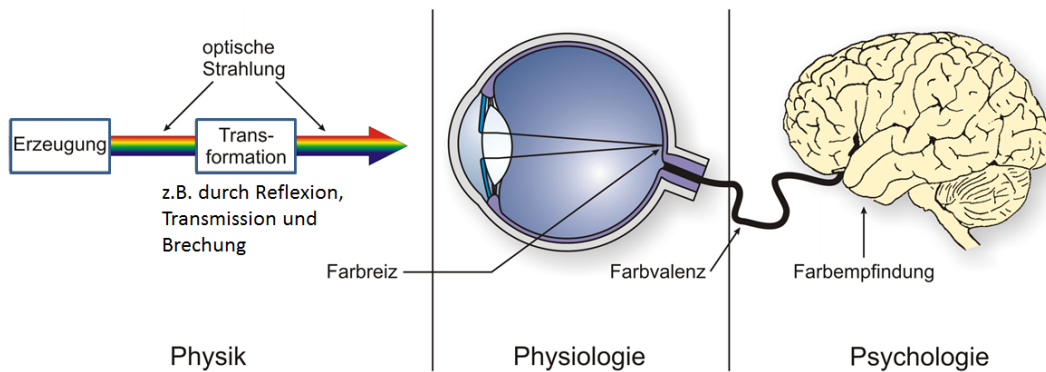


**Abbildung 2.18:** Druckfarbe auf Zeitungspapier: Die Rauheit des Papiers übersteigt die gedruckte Farbschichtdicke [65].

satz der Farbdichtewerte für einen schwarzen Unterdruck zusammen mit Pigmentschichtdicken  $> 0,5 \mu m$  erschien jedoch sinnvoll, sofern beide Farbschichtdicken gleichzeitig verändert würden. Eine Messung der Farbeffekte ist mit einer Ein-Winkel-Geometrie nicht möglich.

### 2.3.3 Farbmessung

Voraussetzung für eine Farbmessung ist die durch die Farbmeterik festgelegte Beschreibung eines visuellen Farbeindrucks durch Maß und Zahl [66]. Die in das Auge einfallende Strahlung (Farbreiz) wird vom Auge in Form einer Farbvalenz an das Gehirn weitergegeben (siehe Abbildung 2.19).



**Abbildung 2.19:** Der menschliche Farbwahrnehmungsprozess [66]

Der Farbreiz wird durch die Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  beschrieben. Sie ergibt sich aus der Multiplikation des Spektrums der Lichtquelle  $S(\lambda)$  mit dem Reflexions-  $\beta(\lambda)$  oder Transmissionsspektrum  $\tau(\lambda)$  des bestrahlten Objekts (siehe Abbildung 2.20, Gleichung 2.11).

$$\varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \quad (2.11)$$

Die Farbvalenz wird in Anlehnung an die drei Zapfenarten des menschlichen Auges, die für die Farbwahrnehmung verantwortlich sind, durch die additive Mischung dreier Primärvalenzen in einem Koordinatensystem abgebildet. Für jede Primärvalenz  $\bar{x}_i$  existiert eine Spektralwertfunktion  $\bar{x}_i(\lambda)$  [66], die der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges angepasst ist [4]. Jede ergibt multipliziert mit der Farbreizfunktion und anschließend integriert über den sichtbaren Spektralbereich einen der drei Farbwerte



$F_{x_i}$  (siehe Gleichung 2.12).

$$F_{x_i} = \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}_i(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.12)$$

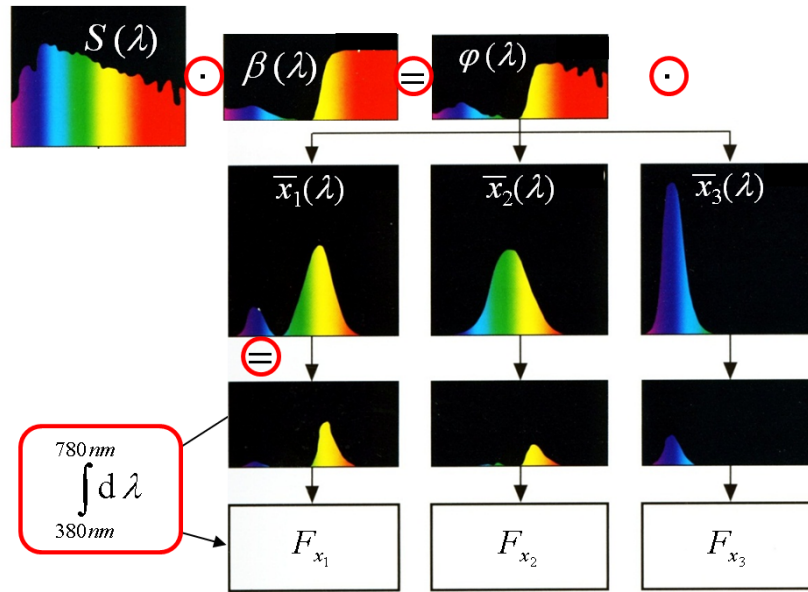


Abbildung 2.20: Berechnung der Farbwerte [66]

Damit werden Farben in einem dreidimensionalen Farbraum durch Farbwerte dargestellt. Die von einer Farbvalenz ausgehende Farbempfindung ist eine subjektive Wahrnehmung und kann daher von Person zu Person unterschiedlich sein. Es gibt verschiedene Farbräume (z.B. RGB, XYZ, CIELAB,...), in denen der Farbart einer Farbe durch die entsprechende Farbgleichung beschrieben werden kann. Ein Farbraum kann oft durch eine Transformationsvorschrift in einen anderen umgerechnet werden. In der Druckbranche werden Farbwerte überwiegend im CIELAB-Farbraum mit Normbeleuchtung D50 und bei einem 2°-Beobachter (in der Spektralwertfunktion berücksichtigt) dargestellt. Im CIELAB-Farbraum werden die drei Raumkoordinaten durch eine Grün-Rot-Achse ( $a^*$ ), eine Blau-Gelb-Achse ( $b^*$ ) und eine Helligkeitsachse ( $L^*$ ) dargestellt (siehe Abbildung 2.21).

Zur Farbmessung werden Spektralfotometer oder Dreibereichsmessgeräte (Kolorimeter) eingesetzt, wobei letztere sich weniger zur Messung absoluter Farbwerte eignen und zunehmend vom Markt verdrängt werden. Bei Spektralfotometern wird die einfallende Strahlung durch einen Monochromator in ihre spektralen Anteile zerlegt (meist in 10 nm-Schritten), die auf den Empfänger (CCD-Chip) treffen und in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Häufig erfolgt eine Umrechnung der spektralen Daten in Farbkoordinaten eines wählbaren Farbraums im Messgerät. In der Druckindustrie werden heutzutage Spektralfotometer mit einer 0°/45° bzw. 45°/0°-Messgeometrie verwendet [36]. Da die spektralfotometrische

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

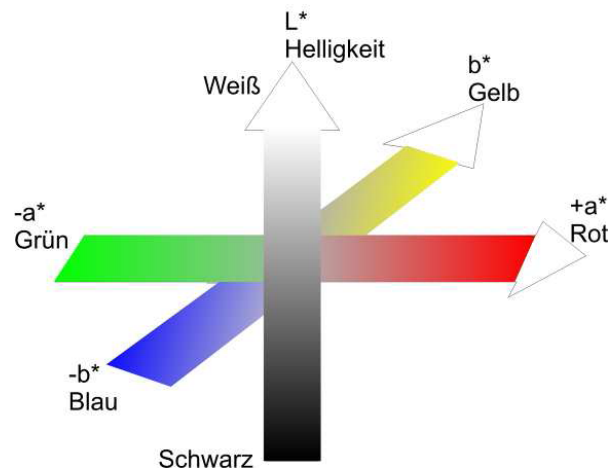


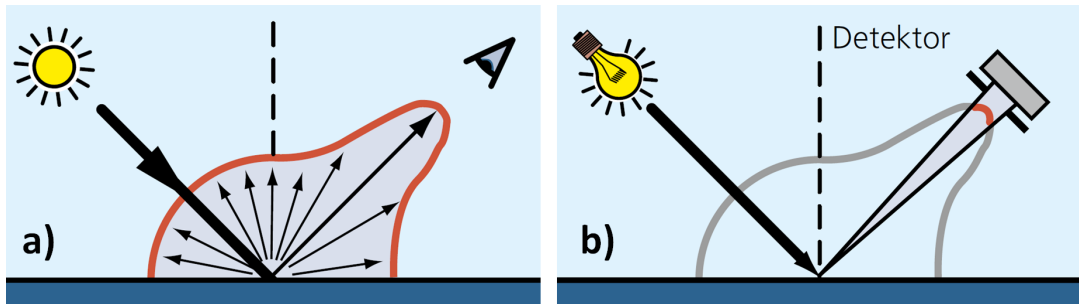
Abbildung 2.21: Skizze des CIELAB-Farbraums (vgl. [67, 15])

Messung von Farbwerten durch die notwendige Berechnung relativ viel Zeit benötigt, sind Messungen in der Druckmaschine bisher schwer möglich. Zur alternativen - jedoch nicht normgerechten - Farbmessung werden immer häufiger RGB-Kamerasysteme angewendet, die eine schnelle Messung der Farbe über eine bildanalytische Auswertung ermöglichen. Die Lichtstrahlung wird in der Kamera durch drei Farbfilter in die Anteile Rot, Grün und Blau aufgeteilt. Eine Umrechnung der vom Chip ausgehenden elektrischen Signale in einen Farbraum (z.B. CIELAB) erfolgt im Anschluss. Ein Vergleich der Messergebnisse mit denen eines Spektralfotometers ist nicht möglich. Neue Entwicklungen, hin zu sogenannten Multispektralkameras (mit 6 bis 16 Farbfiltern), könnten dies jedoch ermöglichen [36]. In Kapitel 6 wird ein kamerabasiertes Druckinspektionssystem zur Messung frisch gedruckter Effektpigmentschichten verwendet. Da dieses System sich in der Praxis zur Erkennung von Druckfehlern und zur Registerüberwachung bewährt hat, wird zunehmend versucht, diesem durch die Implementierung von Software weitere Funktionen, wie die Farb- oder Prozessüberwachung von Druckprodukten, zuzuordnen.

### 2.3.4 Glanzmessung

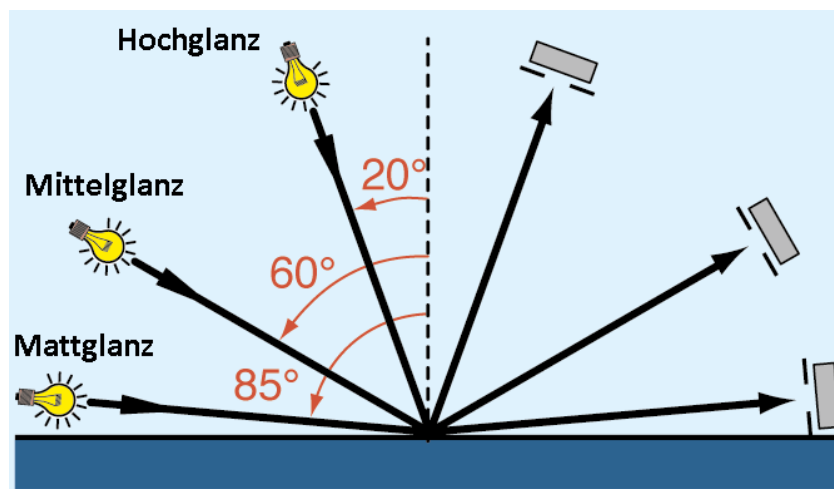
Glanzeffekte entstehen, wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, nach der klassischen Definition durch direkte Lichtreflexion an Oberflächen (siehe Abbildung 2.22). Glanz wird umso stärker wahrgenommen, je gerichteter das Licht reflektiert wird [24].

Um Glanz zu messen existieren je nach dem zu messenden Material unterschiedliche Messvorschriften. Grundsätzlich werden zwei verschiedene Arten der Glanzmessung unterschieden. Die eine berücksichtigt nur das Reflexionsverhalten des auffallenden Lichts (Festwinkelmessgeräte oder Reflektometer), die andere beinhaltet zudem das Streuverhalten der Strahlung (Goniophotometer) [68]. Es kommen Reflektometer zum Einsatz, die die gerichtete Reflexion von Licht in einem schmalen Bereich um den Glanzwinkel mes-



**Abbildung 2.22:** Glanzmessung a: Glanzwahrnehmung durch gerichtete Lichtreflexion  
b: Messung der gerichteten Reflexion in einem schmalen Winkelbereich [24]  
Die Kurve der Streustrahlungsverteilung wird Streuindikatrix genannt.

sen (siehe Abbildung 2.22b). Da die Intensität des gemessenen Lichts materialabhängig ist, werden die Messergebnisse nicht auf die eingestrahlte Lichtintensität bezogen, sondern auf einen schwarzen polierten Glasstandard, dessen Brechzahl bekannt ist [24]. Der Messwert dieses Standards wird auf 100 Glanzeinheiten (GE) oder Glanzpunkte kalibriert [69]. Während metallische Oberflächen nahezu alles einfallende Licht reflektieren, dringt beispielsweise bei Kunststoffen ein Großteil in das Material ein und wird dort größtenteils absorbiert. Bei gedruckten Schichten beeinflusst die Schichtrauheit, die sich durch die Trocknung und das Wegschlagen des Druckfluids in den Bedruckstoff ausbildet, die Glanzwahrnehmung entscheidend. Während beispielsweise Lacke in Deutschland mit Adjektiven wie hochglänzend, glänzend, seidenglänzend, seidenmatt und matt weiterhin nach der “alten” DIN 53778 beschrieben werden [69], werden Oberflächen von Lacken und Kunststoffen international in die Kategorien Hochglanz, Mittelglanz und Mattglanz eingeteilt und nach DIN 67530 [70] bzw. ISO 2813 bei Winkeln von  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  oder  $85^\circ$  vermessen (siehe Abbildung 2.23) [24].

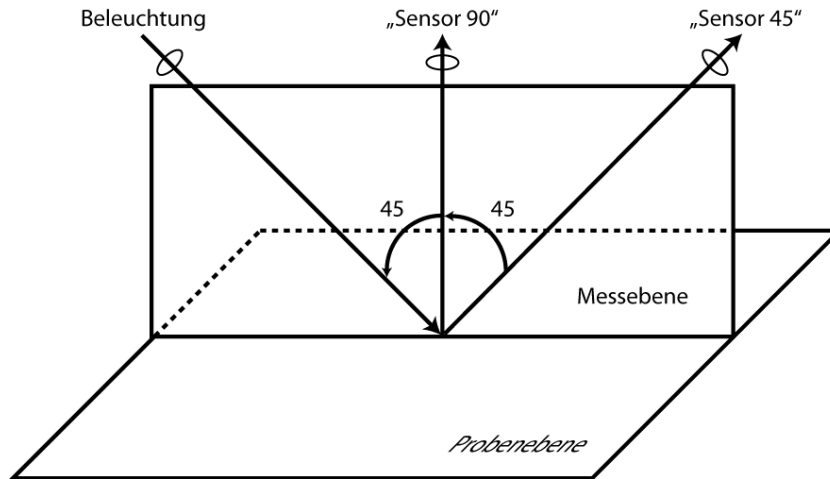


**Abbildung 2.23:** Geometrien zur Glanzmessung [24]

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

Da die nach dieser Norm messenden Geräte absorbiertes und diffus reflektiertes Licht nicht unterscheiden, wird kein Einfluss von Farbe und Helligkeit auf die Glanzwerte übertragen. Dieser Mangel ist in DIN 16537 [71] beseitigt, da zur Ermittlung der Glanzzahl zwei verschiedene Winkel verwendet werden [72]. Die dazugehörige Messgeometrie ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Diese Norm wurde im Jahr 2005 aus



**Abbildung 2.24:** Geometrie zur Glanzmessung mit Helligkeitskompensation (nach [71])

einem dem Autor unbekannten Grund zurückgezogen und ist damit nicht mehr aktuell [73].

In der drucktechnischen Praxis wird die Glanzmessung zur Qualitätskontrolle durch stichprobenartige Vermessung von Druckproben selten angewendet und hat dadurch keine sehr große Bedeutung. Es sind Handmessgeräte mit verschiedenen Winkelanordnungen und nach unterschiedlichen Normen auf dem Markt erhältlich.

### 2.3.5 Messung von Veredelungseffekten

Veredelungseffekte von Druckprodukten werden in der Praxis - abgesehen von der Detektierung von Druckfehlern - selten einer messtechnischen Prozess- oder Qualitätskontrolle unterzogen [74]. Es erfolgt im Regelfall stichprobenartig eine visuelle Abmusterung der Druckerzeugnisse.

Am häufigsten wird die erwähnte Glanzmessung bei Lacken durch Handmessgeräte oder eine spektrale Vermessung in einem Leitstand angewendet (vgl. Kapitel 3.1.2). Beim Prägefoliendruck wird manchmal zur Haftprüfung ein Tesatest angewendet. Die optische Druckqualität wird durch eine visuelle Abmusterung kontrolliert [7].

Die Firma *BYK-Gardner* bietet Messgeräte für die Quantifizierung unterschiedlichster optischer Erscheinungen an [24]. Deren Anwendung ist überwiegend für die Qualitätskontrolle von Oberflächen und Lackierungen in der Automobilindustrie ausgelegt. Mit den angebotenen Geräten können folgende Effekte gemessen werden:

- Glanz (Matt-, Mittel- und Hochglanz), Glanzschleier (milchiges Aussehen), Spiegelglanz
- Farbänderungen, Glitzer, Körnigkeit (optische Rauigkeit)
- Schichtdicke
- Farbe, Helligkeit, Brillanz
- Wolkigkeit (Mottling)
- Welligkeit, Mattigkeit, “Orange Peel”, Abbildeschärfe (Distinctness of Image, DOI)
- Transparenz, Deckvermögen,...

Für das Messen von drucktechnischen Veredelungseffekten sind daraus die Mehrwinkelspektralfotometer zur Erfassung von Farbänderungen und die Glanzmessgeräte die wichtigsten. Die Quantifizierung von Glitzer, Körnigkeit und Wolkigkeit ist ebenfalls interessant. Es ist, besonders in der Forschung, durchaus empfehlenswert neu entwickelte Messgeräte für die Automobilindustrie auf Eignung und Verwendung für Druckprodukte zu testen. Die in dieser Arbeit mehrmals angesprochene unerwünschte Erscheinung der Wolkigkeit (mangelnde Homogenität) gedruckter Schichten, tritt ebenfalls bei Autolacken in Erscheinung [24]. Das zur Messung empfohlene Gerät “Cloud Runner” eignet sich aufgrund einer mindestens 10 cm langen Messstrecke vermutlich kaum für Druckanwendungen [24]. Da die Wirkung von Glanz und Glitzer bei Effektpigmenten noch nicht ausreichend untersucht ist, gibt es am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren ein weiteres Forschungsprojekt zusammen mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, in dem gedruckte Effektpigmentschichten gonioreflektometrisch charakterisiert werden. Mit den daraus gewonnenen Ergebnissen können die Güte von Mehrwinkelspektralfotometern [75] überprüft und pigmentspezifische bidirektionale Reflexionsmodelle entwickelt werden [76]. Die meisten Mehrwinkelspektralfotometer besitzen keine Funktion zur Glitzer- oder Körnigkeitsmessung (optische Rauigkeit). Deshalb werden diese - auch von Interferenzeffektpigmenten hervorgerufene Effekte - im Folgenden nur indirekt zusammen mit der Homogenität gedruckter Schichten beurteilt (siehe Kapitel 3.1.3).

Bei Metalleffektpigmenten können neben Glanzmessgeräten Goniophotometer eingesetzt werden, die die Helligkeit und Brillanz der Pigmentschicht durch den Metalleffektwert (ME-Wert) charakterisieren [35]. Dabei wird die Helligkeitsänderung der beschichteten Fläche bei konstantem Beleuchtungswinkel (z.B. 45°) durch die Variation der Betrachtungswinkel bestimmt. Das Ergebnis ist die Kurve der winkelabhängigen Helligkeitsverteilung (vgl. Streuindikatrix in Abbildung 2.22). Die Messungen sind jedoch sehr aufwendig.

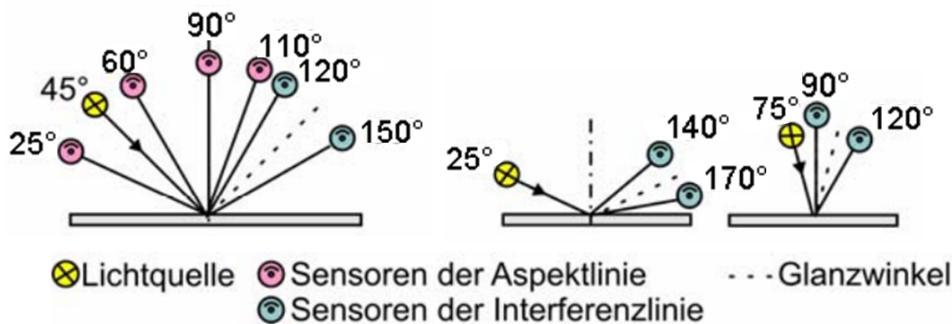
Das Deckvermögen (Opazität) von Druckveredelungen oder Farben kann durch eine farbmetrische Vergleichsmessung von “überdruckten” Schwarz-Weiß-Feldern erfolgen. Ist die Veredelung opak, so unterscheiden sich die Messwerte der Felder mit schwarzem nicht von denen mit weißem Unterdruck [35].

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

Mithilfe von Mehrwinkelspektrofotometern können winkelabhängige Farbänderungen, die von Effektpigmenten hervorgerufen werden, gemessen werden. Es werden drei Gerätetypen unterschieden:

- fester Beleuchtungswinkel - variabler Beobachtungswinkel (Aufnahme der Aspektlinie)
- variabler Beleuchtungswinkel - fester Aspektwinkel (Differenzwinkel zwischen Beobachtungs- und Glanzwinkel, Aufnahme der Interferenzlinie)
- variabler Beleuchtungswinkel - variabler Beobachtungswinkel

Die Beobachtungs- und Beleuchtungsgeometrien der Aspekt- und Interferenzlinie sind in Abbildung 2.25 dargestellt. Sie entsprechen den Messgeometrien des Mehrwinkelspektrofotometers *Multi FX10* von *Data-color* und bis auf den Winkel  $25^\circ/170^\circ$  denen des Normentwurfs *ASTM WK 1164*. Die Winkeldarstellung erfolgt von der Probenebene im Uhrzeigersinn.

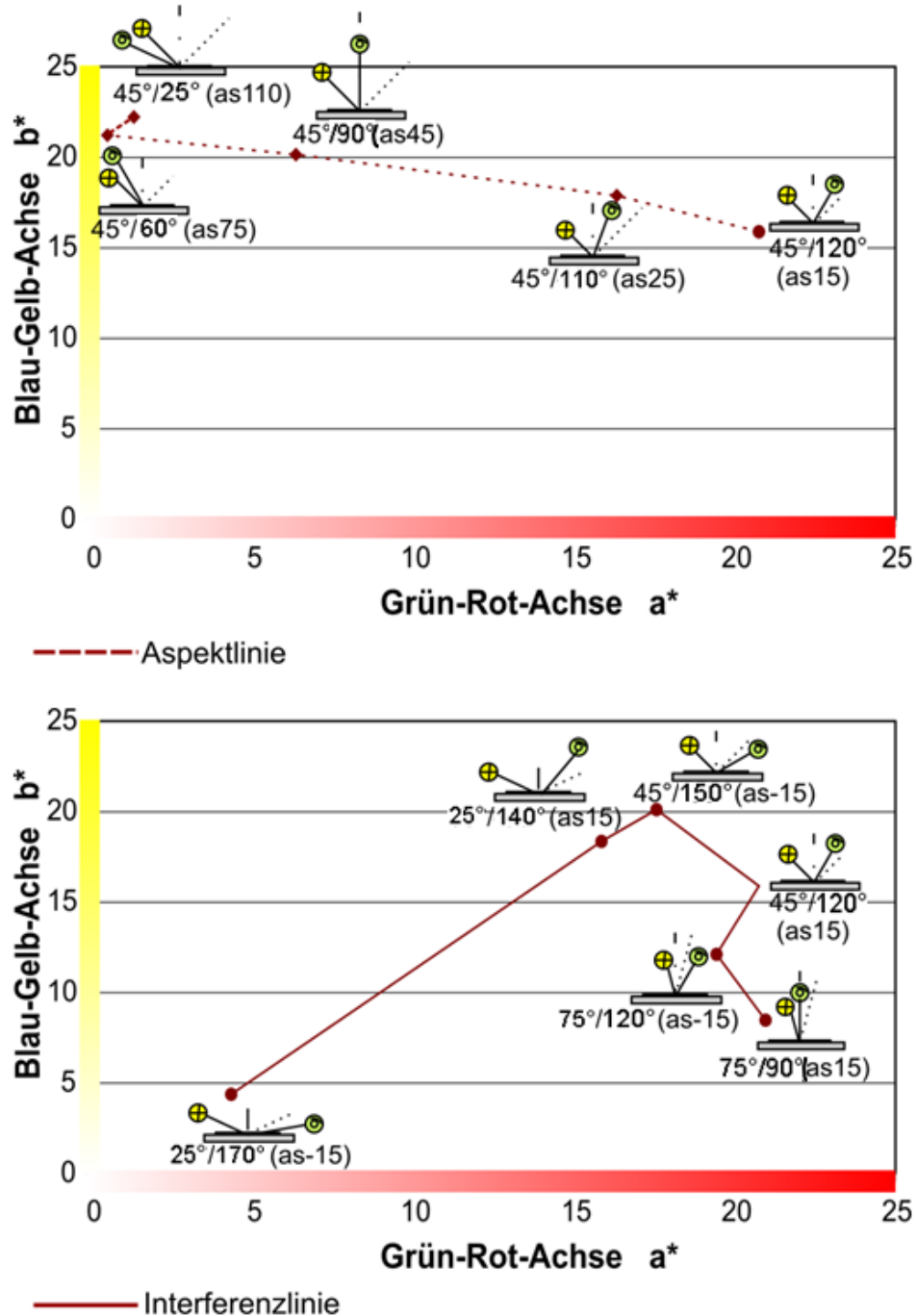


**Abbildung 2.25:** Messgeometrien zur Aufnahme der Aspekt- und Interferenzlinie zur Charakterisierung von Effektpigmenten [77]

Abbildung 2.26 zeigt ein Beispiel einer mit dem *Multi FX10* aufgenommenen Aspekt- und Interferenzlinie der Interferenzeffektfarbe *LithoRed* projiziert auf die  $a^*$ - $b^*$ -Ebene des CIELAB-Farbraums. Es sind je nach Winkelkonfiguration unterschiedliche Farbeindrücke zu erwarten.

Um das visuelle Verhalten von Effektpigmenten der 1. und 2. Generation messen zu können, ist der letztgenannte Gerätetyp notwendig. Nur so kann eine Effektpigmentschicht präzise beurteilt werden [74]. Waren vor wenigen Jahren solche Geräte aufgrund ihrer Größe und Messdauer nur für den F&E-Bereich geeignet [4, 1], so bieten heutzutage mehrere Hersteller portable Handmessgeräte an, die zudem vergleichsweise schnell messen (siehe Kapitel 3.1.1). Als Vergleichswerte unterschiedlicher Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel werden die  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ -Werte und die Farbabstände  $\Delta E_{ab}^*$  oftmals zusammen mit Gewichtungsfaktoren herangezogen [24].

Obwohl produktionstaugliche Mehrwinkelspektrofotometer auf dem Markt sind, werden diese - so wie die anderen genannten Messgeräte mit Ausnahme der Glanzmessgeräte - in der Praxis (in Druckereien) bisher nicht eingesetzt. Die Verwendung neuer Geräte verursacht zusätzlichen Zeitaufwand und Kosten.



**Abbildung 2.26:** Aspekt- und Interferenzlinie der Interferenzeffektfarbe *LithoRed*. Die einzelnen Winkelkombinationen werden wie abgebildet miteinander verbunden. Der Aspektwinkel (as) ist in Klammern angegeben. Er besitzt ein negatives Vorzeichen, falls der Glanzwinkel dem Beleuchtungswinkel näher ist als der Beobachtungswinkel. [15]

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

Bisher existiert zudem keine normgerechte Messmethode zur Charakterisierung von gedruckten Effektpigmentschichten.

### 2.3.6 Trend zur Inline-Messung

Seit einiger Zeit besteht in der grafischen Industrie das Bestreben, gedruckte Schichten inline bezüglich ihrer Farbdichte oder spektral zu vermessen. Wurden beispielsweise bei einer Bogenoffsetdruckmaschine bisher aus den Messergebnissen der stichprobenartig am Leitstand vermessenen Druckkontrollstreifen einzelner Druckbogen die Stellgrößen für das Farbwerk abgeleitet, so soll dies in Zukunft direkt in der Druckmaschine geschehen [38]. Damit wird ein geschlossener Regelkreis erreicht, der es ermöglicht sehr schnell auf Farbschwankungen zu reagieren und Makulatur zu vermeiden. *Pawlowski* beschäftigte sich in seiner Dissertation mit der Inline-Messung der Farbdichte druckfrischer Offsetfarbe mit einem Druckinspektionssystem. Er konnte zeigen, dass die Trockenfarbdichte aus den Messdaten frisch gedruckter Farben prognostiziert werden kann [38]. Im Rahmen der “Seminarreihe Inline-Farbmessung” des Vereins Deutscher Druckingenieure (VDD) im Jahr 2011 stellten die drei großen deutschen Druckmaschinenhersteller (*manroland*, *Koenig & Bauer* und *Heidelberger Druckmaschinen*) und die *BST International* ihre Lösungen zur Inline-Messung von Druckprodukten vor. Alle präsentierten Lösungen zur Inline-Farbdichtemessung [59, 60]. Bei *BST International* ist eine Lösung zur spektralen Inline-Farbmessung in der Entwicklung, die zur Drupa 2012 präsentiert werden soll. Die *Heidelberger Druckmaschinen* bietet schon seit vielen Jahren Systeme zur spektralen Inline-Farbmessung an, die vor allem im Verpackungsdruck immer häufiger eingesetzt werden. Zeitgleich bestehen Forschungsvorhaben, die die Entwicklung eines multispektralen Druckinspektionssystems anstreben, das genaue Spektren liefert, ohne einen Druckkontrollstreifen auskommt und vollflächig misst. Die Realisierung eines solchen Systems würde einen enormen Fortschritt gegenüber existierenden Technologien bedeuten.

Für eine Inline-Messung von Veredelungseffekten existieren sehr wenige Messgeräte. Es sind einige Inline-Glanzmessgeräte erhältlich, die teilweise eine Farbmessung beinhalten [78, 79, 80, 81]. Eine Regelung des Veredelungsprozesses ist dabei jedoch nicht möglich. Zur Inline-Messung von Farbeffekten bietet *BYK-Gardner* seit kurzem das Mehrwinkelspektralfotometer *BYK-mac ROBOTIC* an, das unter sechs Winkeln das Helligkeits- und Color-Shift-Verhalten automatisch erfasst [24]. Das Gerät wurde zur Vermessung von lackierten Automobilkarossen in der Produktionslinie entwickelt. Die Eignung solcher Geräte für gedruckte Interferenzeffektpigmente wird in einem weiteren Forschungsprojekt am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren untersucht [75].



## 2.4 Ziele der Arbeit und Vorgehensweise

Bei einem zunehmenden Markt für veredelte Druckprodukte und der wirtschaftlichen Entwicklung der Druckindustrie ist ein optimaler Einsatz der teuren Effektpigmente erstrebenswert (siehe Abbildung 2.27).



**Abbildung 2.27:** Vom Effektpigment zum hochwertigen Druckprodukt

Die Entwicklung von Hybridmaschinen, durch die Integration von Flexo- und Lackierwerken in Bogenoffsetdruckmaschinen, ermöglicht heutzutage eine technisch sinnvolle Veredelung von Druckprodukten im hochwertigen Verpackungsdruck [82]. Durch die große Nachfrage an veredelten Druckprodukten wächst ebenfalls der Einsatz von Effektpigmenten in der Druckindustrie. Für das Verdrucken von Effektpigmenten existieren seitens der Hersteller und in der Literatur für verschiedene Druckverfahren Verarbeitungsempfehlungen [1, 49, 48, 47, 46, 44, 83], die zu einer hohen Qualität der erzeugten Druckprodukte führen sollen. Diese basieren auf Erfahrungen, die zusammen mit Kunden erarbeitet wurden. Eine systematische Untersuchung der drucktechnischen, trocknungs- und materialspezifischen Parameter auf die durch Effektpigmente hervorgerufenen Farb- und Glanzeffekte an einer industriellen Druckmaschine ist dem Verfasser dieser Arbeit nicht bekannt. Ebenso steht nicht fest, inwieweit ein Abweichen von den Empfehlungen zu einem Qualitäts- bzw. Effektverlust beim Druckprodukt führen kann.

Als entscheidend für optimale Effekte gilt unter anderem eine planparallele Orientierung der Pigmente zum Bedruckstoff [1]. Einerseits wird in der Literatur erwähnt, dass bei Druckprozessen diese Orientierung der Pigmente direkt nach dem Druckspalt durch die Kräfte im Walzenspalt vorliegt [1], andererseits begünstigt besonders bei dickeren Schichten erst das Verdunsten des Lösemittels und der damit verbundene Volumenschrumpfung diese Pigmentorientierung [20]. Da beim Drucken immer eine Farbspaltung nach dem Druckspalt auftritt, kann eine von Anfang an parallele Pigmentorientierung zum Substrat berechtigt in Frage gestellt werden. Es wird ein schnell flüchtiges Lösemittel und eine kurze Trocknungsphase empfohlen [84], damit die Pigmente wenig "Zeit" haben, ihre nach dem Walzenspalt parallele Lage zum Bedruckstoff zu ändern. Eine Quantifizierung der kurzen Verlaufs- bzw. Trocknungszeiten wird ebenso wenig erwähnt, wie die eines Effektverlusts, falls dies nicht berücksichtigt wird. Bei allen bisherigen Emp-

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

fehlungen zur drucktechnischen Applikation von Effektpigmenten fehlt eine gleichzeitige Betrachtung der Einflüsse der druck- und materialspezifischen Parameter auf die gewünschten Effekte und der damit verbundenen Kosten für den Anwender.

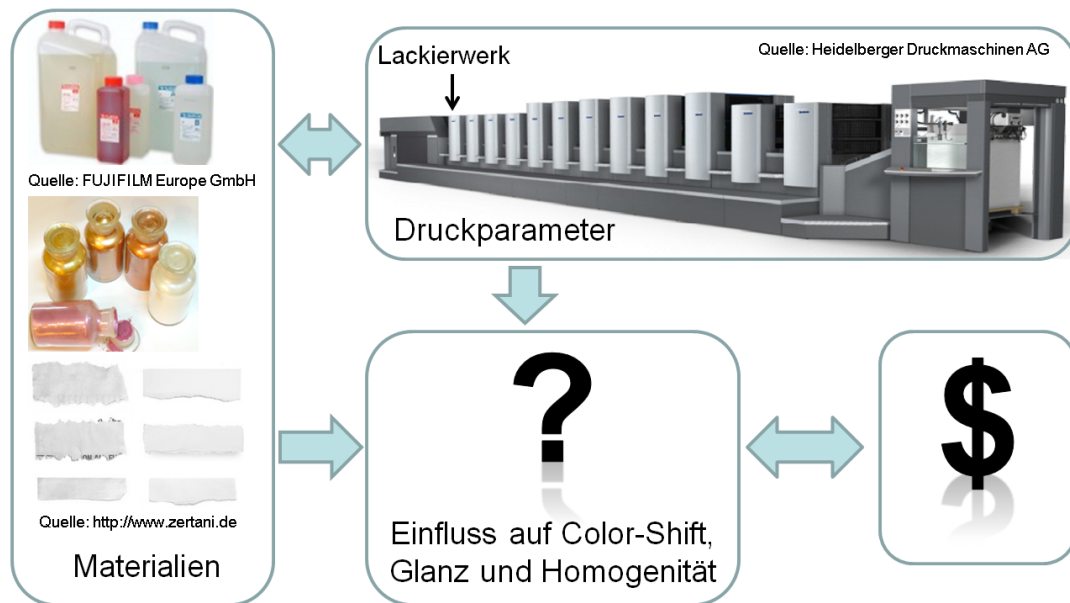
Störungen beim Applizieren werden mit schlechter Pigmentbenetzung durch das Bindemittel oder schlechter Pigmentdispergierung im Bindemittel erklärt. Die Ursache für Pigmentanhäufungen und ungleichmäßige Pigmentverteilungen kann viele Gründe haben. Genannt werden ungeeignete Bedruckstoffe und Druckformen, zu geringer Farbübertrag bei der Farbspaltung sowie ungeeignete Viskosität, Druckgeschwindigkeit und Trocknung [1]. Die Komplexität des Zusammenwirkens der genannten Phänomene ist bisher nicht allgemeingültig erklärbar. Eine Abschätzung der wichtigsten Einflussgrößen auf die optischen Effekte und die Druckqualität liegt bisher nicht vor.

Eine Qualitäts- und Prozesskontrolle von Veredelungseffekten wird in der Produktion nur vereinzelt und überwiegend außerhalb der Druckmaschine für den Glanz angewendet. Obwohl verschiedenste Messgeräte zur Überprüfung des Farbänderungsverhaltens und der Qualität von Effektpigmentschichten existieren (siehe Kapitel 2.3.5, 2.3.6 und [24]), werden diese in der Praxis kaum eingesetzt. Das liegt vermutlich daran, dass diese nur selten "Inline-fähig" sind und Messungen außerhalb der Maschine unverhältnismäßig hohe Kosten verursachen. Einige Geräte wurden für Lackschichten im Automotivebereich entwickelt. Deren Eignung für Produkte der Grafischen Industrie ist noch nicht nachgewiesen.

Um Zeit und Kosten zu sparen, besteht in der Druckindustrie allgemein ein Trend zur Inline-Messung [38, 59, 60]. Auch bei der Messung von Veredelungseffekten werden sich auf Dauer keine Messgeräte außerhalb der Druckmaschine, die in der Produktion regelmäßige Anwendung finden, durchsetzen können. Zur Glanzmessung existieren bereits einige Inline-Geräte [78, 79, 80, 81] und Veröffentlichungen [85, 86] zu deren Anwendung. *Hupp* hat vor einigen Jahren die Notwendigkeit einer Prozesskontrolle für gedruckte Effektpigmentschichten erkannt, und dafür eine Messgröße entwickelt [2, 15]. Diese wurde bisher weder auf ihre Praxistauglichkeit überprüft noch in einem Messgerät umgesetzt.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die Haupteinflussparameter auf die optischen Effekte von gedruckten Effektpigmentschichten zu identifizieren und daraus dem Anwender für das im Verpackungsdruck bedeutende Flexodruckverfahren Kompromissvorschläge für Veredelungen mit Effektpigmenten zu bieten, die trotz moderater Kosten optimale Effekte hervorrufen. Dadurch kann ein Mehrwert zu bisherigen Applikationsprozessen durch Kosteneinsparungen bei gleichbleibenden oder besseren Effekten erreicht werden. Dazu erfolgt die Planung einer umfangreichen Versuchsreihe für das Verdrucken von Effektfarben im Flexodruckwerk einer industriellen Rollendruckmaschine mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung (Kapitel 5). Im besonderen Interesse stehen dabei die Auswirkungen der drucktechnischen Einstellungen und Trocknungsparameter auf die gewünschten Effekte, da dies diejenigen sind, auf die der Maschinenbediener direkten Einfluss hat. Gelingt es, bessere Effekte mit gleichen Kosten zu erreichen, so lässt sich dieser verfahrenstechnische Fortschritt direkt in einen wirtschaftlichen Vorteil umsetzen.

Die Zielgrößen Glanz und Color-Shift werden dabei messtechnisch bewertet, die Beurteilung der Homogenität der gedruckten Effektfarbenschieden erfolgt durch eine visuelle Abmusterung (Kapitel 3). Die Ergebnisse werden in Anwendungsempfehlungen festgehalten (Kapitel 5.5), die gute Veredelungseffekte, hohe Druckqualität und moderate Kosten vereinen (siehe Abbildung 2.28). Die Eignung der Messmittel zur Effektbewertung wird vorher stichprobenartig mit visuellen Abmusterungen überprüft (Kapitel 3.2).



**Abbildung 2.28:** Beziehungen zwischen Materialien, Druckeinstellungen und Qualitätsmerkmalen mit Berücksichtigung der Kosten

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Nutzung eines kamerabasierten Druckinspektionssystems, wie es in Druckmaschinen zur Fehlererkennung verwendet wird, zur Überprüfung der Pigmentorientierung und zur Prozesskontrolle gedruckter Effektpigmentschichten. Dazu wird in einem vorhandenen Versuchsstand eine Bogenoffsetmaschine für den Flexodruck umgebaut. Drei verschiedene Effektpigmente mit unterschiedlichen Pigmentkonzentrationen werden damit auf verschiedene Bedruckstoffe gedruckt und nach der Applikation über einige Minuten mit einer Kamera betrachtet. Ändern sich die Messwerte über die Zeit, so kann eine Umlagerung der Pigmente nicht ausgeschlossen werden.

Durch eine anschließende Vermessung der Druckbogen mit einem Mehrwinkelspektrofotometer kann der von *Hupp* definierte Helligkeitswert zur Prozesskontrolle von Effektpigmentschichten  $L_H$  [2, 15], der als Maß für die Schichtdicke verwendet werden kann, mit dem aus den Kameradaten berechneten Wert  $L_{H,K}$  verglichen werden. Damit kann die Eignung eines Druckinspektionssystems zur Prozesskontrolle für im Flexodruck hergestellte Effektpigmentschichten bestätigt oder in Frage gestellt werden.

Diese Arbeit steht im Zusammenhang mit vielen weiteren Forschungsaktivitäten am Institut für Druckma-

## 2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL

---

schinen und Druckverfahren und widmet sich hauptsächlich anwendungsorientierten Problemstellungen im Zusammenhang mit dem Verdrucken von Interferenzeffektfarben in industrienahen Druckmaschinen. Dabei steht die Interpretation der Druckergebnisse hinsichtlich der Variation der drucktechnischen und materialspezifischen Parameter im Vordergrund [31]. *Hupp* legte durch ihre Untersuchungen gedruckter Interferenzeffektfarben der ersten Generation die Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten rund um Spezialeffektpigmente am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren [87, 77, 2, 15]. *Kehren* konzentriert sich auf die Entwicklung einer bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) für Effektfarben, greift dabei auf Daten umfangreicher Druckversuche mit 28 Effektpigmentarten und Gonioreflektometermessungen an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt zurück und untersucht Mehrwinkelspektrofotometer auf ihre Eignung zur Charakterisierung von Effektpigmenten [76, 75]. Während sich *Pawlowski* mit dem Einfluss trocknender Farbschichten auf eine kamerabasierte Dichtemessung beschäftigte [38], erforschen *Sauer* und *Bornemann* unterschiedliche physikalische Effekte, die Einfluss auf die Filmbildung und Schichtstabilität beim Drucken dünner Schichten haben [55, 88, 89, 90]. Das Farbübertragungsverhalten von Rasterwalzen untersucht *Thieme* in seiner Arbeit und hinterfragt dabei die Messmethoden kritisch, die die Hersteller zur Angabe des theoretischen Schöpfvolumens heranziehen [91]. *Griesheimer* erforscht die Vorgänge der Farbspaltung bei Flexodruckformen unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit experimentell [92], während *Theopold* die Eignung von Flexodruckformen für das Drucken funktionaler Fluide und der dabei eingesetzten Lösemitte untersucht [51]. Die im Flexodruck ungewünschten Quetschränder, die durch die elastische Verformung der Druckform beim Drucken entstehen, macht sich *Ranfald* für das Drucken von Source-Drain-Strukturen von Transistoren zu nutzen [93]. *Happel* erforschte die Lichtstreuung im Papier und ihren Einfluss auf die optische Wirkung von gedruckten Schichten. Dabei wurde ein Prüfstand und ein Modell entwickelt mit dem die Lichtstreuungseigenschaften von Papier gemessen werden können und damit die optische Beeinflussung von Druckpunkten vorhergesagt werden kann [94]. Die Erkenntnisse dieser Forschungsaktivitäten fließen an vielen Stellen in diese Arbeit ein und erleichtern die Interpretation der Ergebnisse der praxisorientierten Druckversuche.

In Kapitel 3 werden zunächst die zur Bewertung der optischen Effekte gedruckter Effektpigmentschichten benötigten Qualitätsmerkmale definiert, erklärt und entsprechende Messmethoden zu deren Quantifizierung durch visuelle Abmusterungen überprüft. In Kapitel 4 werden die Erfahrungen und Erkenntnisse aus ersten Druckversuchen mit Effektpigmenten zusammengetragen, die für die Planung einer umfangreichen Versuchsreihe auf einer industriellen Druckmaschine (siehe A.2) mithilfe der Methode der statistischen Versuchsplanung benötigt werden. In Kapitel 5 wird die Vorgehensweise bei der statistischen Versuchsplanung am Beispiel der zu planenden Versuchsreihe vorgestellt, die Auswertung der Versuche durch eine Regressionsanalyse beschrieben und die Ergebnisse zusammen mit einer Betrachtung der Materialkosten

in Anwendungsempfehlungen zusammengefasst. In Kapitel 6 erfolgen in einem Prüfstand durch kamerabasierte Messungen Untersuchungen zu einer möglichen Pigmentumorientierung nach dem Druckprozess und zur Eignung eines Druckinspektionssystems für die Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Forschungsaktivitäten gegeben.

## **2. AUSGANGSSITUATION UND ZIEL**

---

## 3

# Qualitätsmerkmale gedruckter Effektpigmentfarben

In diesem Abschnitt werden zuerst die Qualitätsmerkmale, die zur Bewertung der gedruckten Effektpigmentschichten verwendet werden, definiert und erklärt. Nach einer Überprüfung der Eignung der verschiedenen Messmittel im Vergleich zu visuellen Abmusterungen werden abschließend die in dieser Arbeit verwendeten Mess- und Bewertungsmethoden festgelegt.

### 3.1 Definition der Qualitätsmerkmale

Es existieren unterschiedliche Beschreibungen für die optischen Effekte, die von gedruckten Interferenzeffektfarben hervorgerufen werden. Daher ist es besonders für visuelle Beurteilungen und für eine möglichst klare Abgrenzung dieser Effekte wichtig, einheitliche Vorstellungen von denselben zu besitzen. Aus diesem Grund werden im Folgenden Definitionen der in dieser Arbeit betrachteten Qualitätsmerkmale gegeben. Auf den Effekt des Glitzerns wird nicht im Detail eingegangen, da er bereits in Kapitel 2.1.2 erklärt wurde und nicht im Fokus dieser Arbeit steht.

**Color-Shift** Mit Color-Shift oder Farbflop ist die Farbänderung der Effektpigmentdruckproben gemeint, die der Betrachter durch die Änderung des Betrachtungswinkels wahrnimmt. Derartige Farbänderungen werden beispielsweise durch ein Verkippen oder Wölben der Druckprobe sichtbar (siehe Abbildung 3.1). Die Güte des Color-Shifts ist umso höher, je besser sich die beiden beobachteten Farben unterscheiden lassen.

**Glanz** Glanz ist die Eigenschaft einer Oberfläche, Lichtstrahlen in eine Vorzugsrichtung zu reflektieren. Je glänzender ein Objekt ist, umso ähnlicher erscheint sein Reflexionsverhalten dem eines Spiegels. Der Glanz bei Interferenzeffektpigmentschichten bezeichnet alle Reflexionseigenschaften, die durch Streuung und Reflexion an den verschiedensten Grenzflächen in spekularer Richtung (Richtung

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---

des Glanzwinkels) im Verhältnis zu einem perfekten Streuer (Lambert-Strahler) wahrgenommen werden.

**Homogenität** Eine Druckprobe, deren gedruckte Schichten keine sichtbaren Unregelmäßigkeiten aufweisen, gilt als homogen. Bei Effektpigmenten äußert sich ein inhomogenes Erscheinungsbild durch wolkige Bereiche, die auf eine ungleichmäßige Pigmentverteilung zurückgeführt werden kann, durch Stellen unzureichender Benetzung oder sichtbar unterschiedlicher Schichtdicken. Je inhomogener eine gedruckte Fläche erscheint, desto geringer wird die Druckqualität bei einer visuellen Abmusterung eingeschätzt und als umso störender die Unregelmäßigkeiten empfunden. Eine Bewertung der Homogenität von gedruckten Schichten ist nur sinnvoll, wenn auch eine flächig gleichmäßige Schicht erzeugt werden soll.

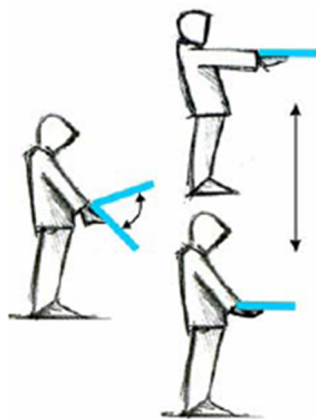
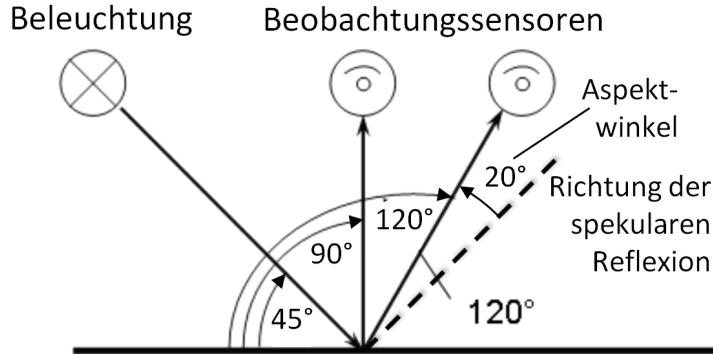


Abbildung 3.1: Visuelle Abmusterung von Effektpigmentschichten [95]

#### 3.1.1 Messung des Color-Shift

Konventionelle Druckfarben besitzen einen Farbart, der unter einem Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  oder umgekehrt gemessen werden kann. Als Hauptmerkmal der Interferenzeffektpigmente gilt jedoch die als Color-Shift bezeichnete Farbänderung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Lichts [1]. Die Farbwirkung ändert sich abhängig vom Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel. Zur messtechnischen Charakterisierung der Farbwirkung werden Mehrwinkelspektrofotometer eingesetzt (siehe Kapitel 2.3.5). Durch die Betrachtung der Aspekt- (fester Beleuchtungswinkel) und Interferenzlinie (fester Aspektwinkel - z.B.  $15^\circ$ ) einer Druckprobe kann deren Farbänderung nachvollzogen werden. Der Aspektwinkel ist dabei der Differenzwinkel zum jeweiligen Glanzwinkel, der wiederum vom Beleuchtungswinkel abhängig ist (siehe Abbildung 3.2). Der Normentwurf ASTM WK 1164 zur Mehrwinkel-farbmessung von Materialien mit Interferenzeffektpigmenten aus dem Jahre 2006, der mittlerweile in der





**Abbildung 3.2:** Messgeometrie zur Berechnung des  $\Delta E_H^*$ -Werts (Beleuchtungswinkel  $45^\circ$ , Beobachtungswinkel  $90^\circ$  und  $120^\circ$ ) ([31] ergänzt). Die Richtung der spekularen Reflexion entspricht der des Glanzwinkels.

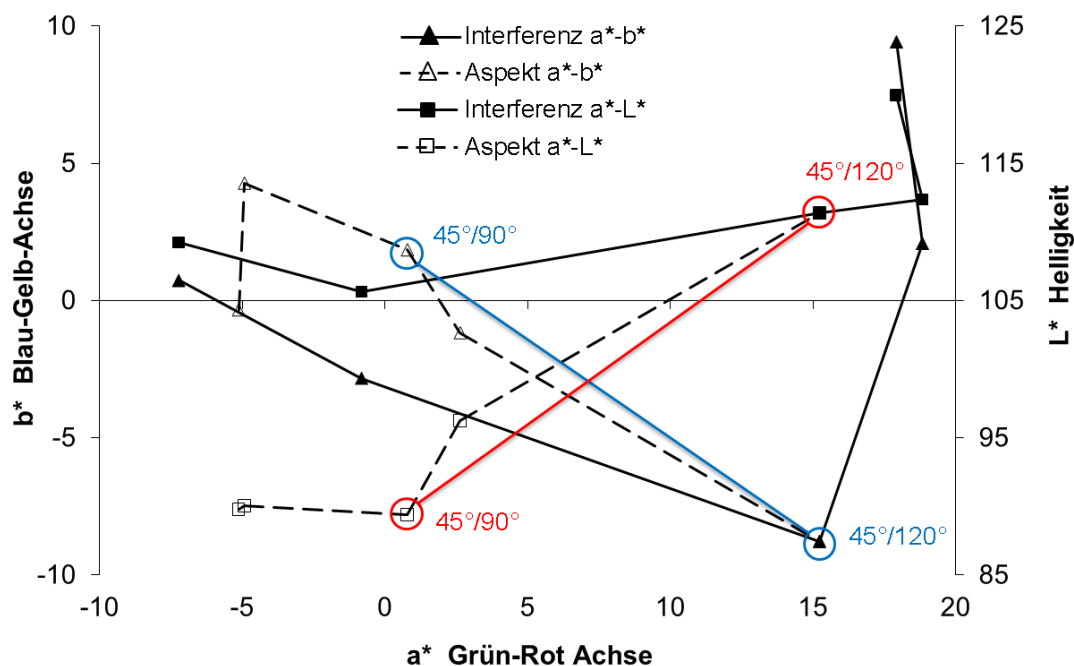
Norm ASTM E2539-08 umgesetzt wurde, empfiehlt dazu neun verschiedene Messgeometrien [96, 97, 15]. All diese zu berücksichtigen war mit dem ersten auf dem Markt erhältlichen Mehrwinkelspektrofotometer *Multi FX10* von *Datacolor* [98] sehr zeitaufwändig (ca. 2,5 Minuten pro Messung). Außerdem liefern die Messungen keinen einzelnen qualitativen Wert, der den Color-Shift beschreibt und sich für einen Vergleich unterschiedlicher Effektpigmentfarben und -schichten eignet. *Hupp* suchte deshalb nach Möglichkeiten, um mit wenigen Messgeometrien, den Color-Shift bei gedruckten Effektpigmentschichten beschreiben und durch einen einzigen Wert quantifizieren zu können [87, 15]. Sie empfiehlt demnach, den aus den Messgeometrien  $45^\circ/90^\circ$  und  $45^\circ/120^\circ$  (siehe Abbildung 3.2) nach Formel 3.1 berechneten  $\Delta E_H^*$ -Wert als Quantifizierungsmaß zu verwenden. Dieser eigne sich für Effektpigmentschichten, die sowohl im Offsetdruck als auch im Flexodruck hergestellt wurden. Bei Pigmenten der 1. Generation dient letztgenannte Messgeometrie zur Bestimmung der Interferenzfarbe, erstgenannte zur Erfassung der durch die Bedruckstoffreflexion überlagerten Gegenfarbe [15].

$$\Delta E_H^* = \sqrt{\left(L_{45^\circ/90^\circ}^* - L_{45^\circ/120^\circ}^*\right)^2 + \left(a_{45^\circ/90^\circ}^* - a_{45^\circ/120^\circ}^*\right)^2 + \left(b_{45^\circ/90^\circ}^* - b_{45^\circ/120^\circ}^*\right)^2} \quad (3.1)$$

Je größer der  $\Delta E_H^*$ -Wert ist, umso größer ist auch der Color-Shift. Begründet wird die Eignung dieses Wertes damit, dass die beiden Farborte, die sich aus den genannten Messgeometrien ergeben, im *CIE-LAB*-Farbraum bei Interferenzeffektpigmentschichten immer ausreichend weit entfernt liegen und damit der Beschreibung einer Farbänderung genügen. Dieser euklidische Abstand wird durch den  $\Delta E_H^*$ -Wert dargestellt.

Abbildung 3.3 zeigt die auf die  $a^*-b^*$ -Ebene (Dreiecksmarker) und  $a^*-L^*$ -Ebene (Quadratmarker) projizierten Interferenz- (durchgezogene Linien) und Aspektlinien (gestrichelte Linien) einer Druckprobe. Jeder markierte Punkt der Linien steht dabei für eine bestimmte Beleuchtungs- und Beobachtungssituation. Die Interferenzlinie wird aus der Verbindung der Messpunkte der Messgeometrien 2, 3, 4, 5 und 6,

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN



**Abbildung 3.3:** Interferenz- und Aspektlinien einer Effektpigmentfarbe (*Colorstream*® T10-02 Arctic Fire 20 %, gedruckt auf MC-Offset) in die  $a^*$ - $b^*$ -Ebene ( $\triangle$ ) und  $a^*$ - $L^*$ -Ebene ( $\square$ ) projiziert. Damit kann der Abstand von Farborten im CIELAB-Farbraum zweidimensional dargestellt werden. Jede Markierung steht für eine bestimmte Messgeometrie bzgl. der Beleuchtungs- und Beobachtungssituation (vgl. Abbildung 2.26). Eingezeichnet sind die projizierten Abstände der Farborte der Geometrien  $45^\circ/90^\circ$  und  $45^\circ/120^\circ$  (blau:  $a^*$ - $b^*$ -Ebene, rot:  $a^*$ - $L^*$ -Ebene). Die Winkelkombination  $25^\circ/170^\circ$  wurde bei der Interferenzlinie nicht berücksichtigt. Der Messwert der  $45^\circ/120^\circ$ -Geometrie liegt sowohl auf der Aspekt- als auch auf der Interferenzlinie.

### 3.1 Definition der Qualitätsmerkmale

die Aspektlinie aus denen der Messgeometrien 10, 9, 8, 7 und 4 aus Abbildung 3.4c gebildet. Eingezeichnet sind die projizierten Entfernungen, die durch den  $\Delta E_H^*$ -Wert der Messgeometrien  $45^\circ/90^\circ$  (markierte linke Punkte) und  $45^\circ/120^\circ$  (markierte rechte Punkte) beschrieben werden (blau:  $a^*$ - $b^*$ -Ebene, rot:  $a^*$ - $L^*$ -Ebene). Letztere Geometrie tritt jeweils sowohl in der Interferenz- als auch in der Aspektlinie auf. Zur Messung des Color-Shifts werden in dieser Arbeit zwei Mehrwinkelspektrofotometer verwendet (siehe Abbildung 3.4):

- *Multi FX10* von *Datacolor* (Eingeblendet ist die motorisch verschiebbare “Halfpipe” mit fest zueinander zugeordneten Beleuchtungs- und Beobachtungspositionen.) [98]
- *MA98* von *X-rite* [99]

a)

b)

		Winkel	
Nr.	Beleuchtung	Beobachtung	Aspekt
1	25°	170°	-15°
2	25°	140°	+15°
3	45°	150°	-15°
4	45°	120°	+15°
5	75°	120°	-15°
6	75°	90°	+15°
7	45°	110°	+25°
8	45°	90°	+45°
9	45°	60°	+75°
10	45°	25°	+110°

**Abbildung 3.4:** Eingesetzte Mehrwinkelspektrofotometer

a: *Multi FX10* von *Datacolor* b: *MA98* von *X-rite* c: Messgeometrien. Winkelangaben nach Abbildungen 2.25 und 2.26. Die beiden oberen (grau) gekennzeichneten Winkel können nicht vom *MA98* gemessen werden. Die beiden unteren (grün) gekennzeichneten Messgeometrien werden für die Quantifizierung des Color-Shift herangezogen.

Die Hauptvorteile des *MA98* liegen bei der kurzen Messdauer (2 s), der Ausführung als Handgerät und der kleineren Messfläche ( $4\text{ cm}^2$  im Vergleich zu  $14\text{ cm}^2$  beim *Multi FX10*). Nachteilig ist, dass es nur zwei verschiedene Beleuchtungswinkel besitzt. Alle im Zuge dieser Arbeit gedruckten Proben sind so groß, dass sie mit beiden Geräten vermessen werden können. Bei beiden Geräten wurde für alle vermessenen Proben folgendes beachtet:

- Beleuchtung: Normlicht D50
- Beobachter:  $2^\circ$
- Vermessung der Proben quer zur Druckrichtung (Achse der “Halfpipe” in Druckrichtung)
- 3-faches Messen jeder Probe an derselben Stelle
- Papier *Phönix Imperial II* (bzw. *Xantur* für Proben aus Kapitel 6) von *Scheufelen* als Messunterlage

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---

- Mittelung der  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$  Werte und anschließende Berechnung des  $\Delta E_H^*$ -Wertes nach Gleichung 3.1

Da bei einigen Proben während der Messungen mit dem *Multi FX10* durch andere Nutzer das Messgerät auf Normlicht D65 und einen  $10^\circ$ -Beobachter umgestellt wurde, erfolgte nachträglich eine Berechnung der  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$  Werte aus den spektralen Messdaten der beiden Messgeometrien und einigen Umrechnungen mit MATLAB *R2010a*. Dabei konnte weitestgehend auf Codes zurückgegriffen werden, die im Rahmen der Vorlesung “Praktische Farbmessung” am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren verwendet werden (siehe [36]). Dies konnte umgesetzt werden, da zusätzlich zu den geräteseitig berechneten Werten, für alle Proben die spektralen Daten in  $10\text{ nm}$ -Schritten von  $400 - 780\text{ nm}$  aufgezeichnet wurden. Eine Kalibrierung der Messgeräte erfolgte beim *Multi FX10* an jedem Messtag mit einem Weißstandard und beim *MA98* zusätzlich mit einer Lichtfalle als Dunkelreferenz. Grundsätzlich wurden alle Proben, die mit einem Mehrwinkelspektrofotometer vermessen wurden, ebenfalls einer Glanzmessung unterzogen.

In Kapitel 3.2 erfolgt zunächst eine Überprüfung der Eignung des  $\Delta E_H^*$ -Wertes zur Beschreibung des Color-Shift und anschließend ein Vergleich beider Messgeräte.

#### 3.1.2 Glanzmessung

Zur Glanzmessung wird für alle Proben das Glanzmessgerät *Vipgloss-1* von *FAG* verwendet (siehe Abbildung 3.5) [71]. Es arbeitet nach der nicht mehr aktuellen Norm DIN16537 [71], dessen Messweise in Abbildung 2.24 dargestellt ist. Die Reflexion wird im Glanzwinkel und senkrecht zur Probe gemessen. Die Messung senkrecht zur Probe dient dazu, den Einfluss von Farbe und Helligkeit auf die Glanzwerte zu berücksichtigen.



Abbildung 3.5: Glanzmessgerät *Vipgloss-1* von *FAG*

Als Lichtquelle kommt eine Wolframlampe zum Einsatz. Der Glanz von Papier- oder Druckproben beschreibt das Reflektometer durch die visuelle Glanz-Zahl  $G$ , die nach Gleichung 3.2 berechnet wird und Werte von 1 – 10 annehmen kann. Dabei sind  $I_{45^\circ}$ ,  $I_{90^\circ}$  die bei  $45^\circ$  bzw.  $90^\circ$  von den Sensoren gemessenen

Intensitäten des reflektierten Lichts (siehe Abbildung 2.24) und  $k$ ,  $N$  zwei Konstanten. Die kreisförmige Messfläche ist  $5\text{ mm}^2$  groß.

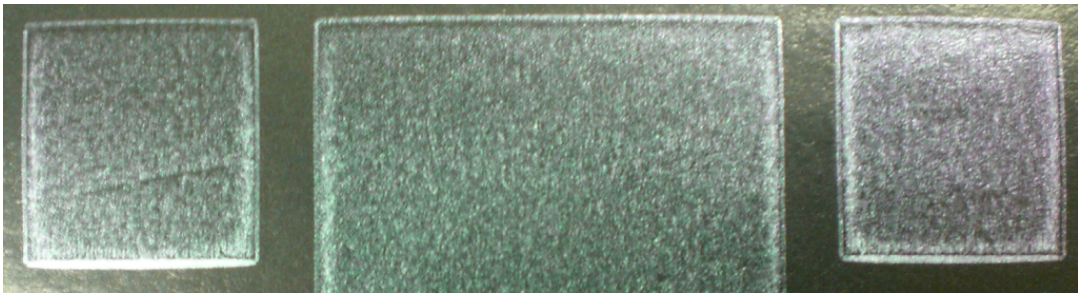
$$G = 5 \cdot \log \left( 1 + 99 \cdot \frac{I_{45^\circ} \cdot k \cdot I_{90^\circ}}{N} \right) \quad (3.2)$$

Eine wirkliche Kalibrierung bietet das Messgerät nicht. Es werden lediglich an jedem Messtag die Abweichungen von den Zielwerten bezüglich einer schwarzen Glanz- ( $\cong 9,9$ ) und Mattreferenz ( $\cong 2,7$ ) erfasst. Das Messgerät bietet die Möglichkeit, relativ in Bezug zu einer Referenzprobe oder absolut zu messen. In dieser Arbeit werden ausschließlich absolute Glanzmessungen durchgeführt. Als Glanzwert einer Druckprobe wird der Wert bezeichnet, der dem Mittelwert der Glanz-Zahlen  $G$  aller durchgeführten Messungen entspricht.

#### 3.1.3 Homogenität

Das letzte zu beschreibende Qualitätsmerkmal der Effektpigmentdrucke ist die Homogenität der gedruckten Schicht. In vielen durchgeführten Versuchen wurden Inhomogenitäten im Ausdruck beobachtet, die einen wolkigen Eindruck der gedruckten Effektpigmentschicht vermitteln (siehe Abbildung 3.6). Dies wird ebenfalls in der Literatur erwähnt [1]. Die drucktechnischen Ursachen dafür konnten bisher nicht geklärt werden. Da eine gewisse Homogenität der Effektpigmentschichten Grundvoraussetzung für den Absatz der Druckerzeugnisse ist, gilt es diese Wolkigkeit möglichst gering zu halten. Wird im Folgenden eine Druckprobe als homogen bezeichnet, so ist keine Wolkigkeit zu beobachten.

Da ein schwarzer Unterdruck durch die Absorption der Lichtstrahlen die Interferenzfarbe der Pigmente besonders gut sichtbar macht (siehe Abbildungen 3.6 und 2.4), werden auch Inhomogenitäten visuell sehr gut sichtbar.



**Abbildung 3.6:** Beispiel für eine wolkige Druckprobe: Die mit *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmenten versetzte gedruckte Schicht weist sichtbare Inhomogenitäten auf. Neben der Inhomogenität sind Quetschränder und ein Color-Shift von grün nach rot erkennbar.

Es liegt die Vermutung nahe, dass, um dies zu vermeiden, Effektpigmentfarben in der Praxis selten auf dunkle Untergründe gedruckt und oftmals mit Absorptionsfarben überdruckt werden. Damit werden Inhomogenitäten auf Kosten des Haupteffekts der Pigmente unterdrückt. Gelingt es, Inhomogenitäten durch

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---

geeignete Druckeinstellungen zu vermeiden, so können dadurch ebenfalls die Farbeffekte der Pigmente in Druckprodukten besser ausgenutzt werden.

Bisher gibt es keine Messmethode, die die Homogenität von Druckprodukten beschreibt. Deshalb wird in Kapitel 3.2.3 versucht, eine solche Methode zu entwickeln, die in der Lage ist, das Qualitätsmerkmal Homogenität in Übereinstimmung mit dem visuellen Empfinden hinreichend genau darzustellen.

## 3.2 Messmittelanalysen

Da die Qualitätsmerkmale Color-Shift, Glanz und Homogenität gedruckter Effektpigmentschichten subjektive Empfindungen beschreiben, können diese von unterschiedlichen Personen unterschiedlich empfunden werden. Es gilt deshalb in diesem Kapitel zu überprüfen, ob messtechnisch ermittelte Größen ausreichend gut mit den visuellen Empfindungen übereinstimmen und ob unterschiedliche Messgeräte vergleichbare Ergebnisse liefern. Dies ist notwendig, da diese Qualitätsmerkmale die Zielgrößen für die in Kapitel 5 dargestellten Versuche nach statistischer Versuchsplanung darstellen. Als eine wichtige Voraussetzung für die Ermöglichung einer Effektberechnung gilt, dass die Zielgrößen messbar sind und kontinuierliche Größen darstellen [100]. Um dies gewährleisten zu können, werden im Folgenden Messmittelanalysen zu den Effekten Color-Shift, Glanz und Homogenität durchgeführt, die auf einem Vergleich von subjektiv und messtechnisch gewonnenen Daten basieren. Es werden die eingesetzten Prüfstände kurz dargestellt und die messtechnisch und visuell gewonnenen Ergebnisse verglichen. Weiterhin wird eine Messmethode vorgestellt, die zur Messung der gedruckten Schichtdicken verwendet wird.

### 3.2.1 Color-Shift und Glanz

Zur Überprüfung der Eignung der gewählten Messmittel für den Color-Shift und Glanz werden auf einer Laborflexodruckmaschine (FLP-21, siehe Abbildung 3.7) mit einer Bänderwalze (Schöpfvolumina  $10,8 / 14,4 / 17,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^2}$ ) auf unterschiedlichen Bedruckstoffen mit einem wasserbasierten Lack (*FLHF00001* von *SunChemical*) Druckversuche durchgeführt. In den Lack sind die Pigmente Iriodin<sup>®</sup> 211 Rutil Feinrot [101], Iriodin<sup>®</sup> 7215 Ultra Rot [102] bzw. Colorstream<sup>®</sup> T 10-02 Arctic Fire [25] in 10- bzw. 20-prozentiger Konzentration (Gewichtsprozent) eingemischt. Die Druckgeschwindigkeit beträgt  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ . Die variierenden Parameter sind in Tabelle 3.1 zusammen mit den Abkürzungen, die in den Abbildungen 3.10, 3.11, 3.12 und 3.13 verwendeten werden, dargestellt. Mit Schöpfvolumen ist hierbei das vom Hersteller angegebene theoretische Schöpfvolumen der Rasterwalze gemeint.

Wie in Kapitel 3.1.1 aufgezeigt, kann der Color-Shift durch eine messtechnische Bestimmung der  $L^*$ -,  $a^*$ - und  $b^*$ -Werte der Remission der Messgeometrien  $45^\circ/90^\circ$  und  $45^\circ/120^\circ$  und einer anschließenden Berechnung des  $\Delta E_H^*$ -Wertes dargestellt werden. Je größer der Wert ist, desto größer ist auch der Color-Shift.



**Abbildung 3.7:** Laborflexodruckmaschine FLP-21

**Tabelle 3.1:** Versuchsparameter zur Messmittelanalyse

Eigenschaft	Abkürzung	
Bedruckstoff	<i>MC-Offset</i>	MC
	<i>Maxi Satin</i>	MS
	<i>Profi-Label Gum</i>	PL
	<i>Chromolux grau</i>	CL
Pigmentart	<i>Iriodin® 211 Rutil Feinrot (5 – 25 µm)</i>	IF
	<i>Iriodin® 7215 Ultra Rot (10 – 60 µm)</i>	IU
	<i>Colorstream® T10-02 Arctic Fire (10 – 50 µm)</i>	CS
Pigmentierung	10 Gew. %	10
	20 Gew. %	20
theoretisches	$10,8 \text{ cm}^3/\text{m}^2$	a
Schöpfungsvolumen der	$14,4 \text{ cm}^3/\text{m}^2$	b
Bänderwalze	$17,0 \text{ cm}^3/\text{m}^2$	c

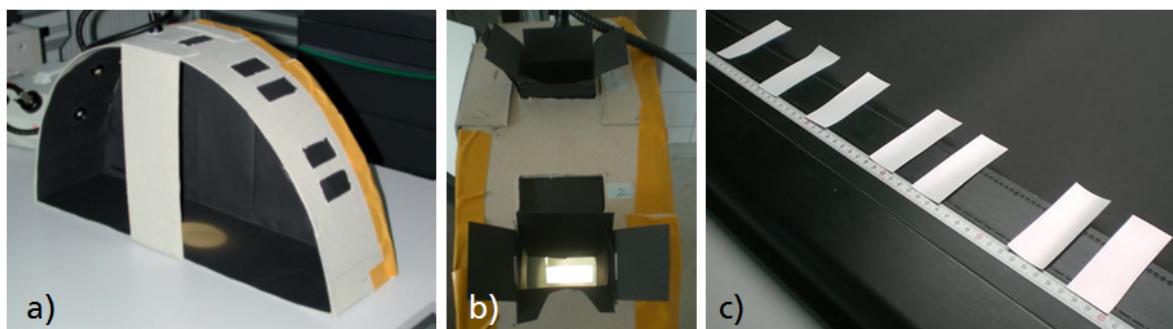
### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---

Die messtechnische Erfassung der Remissionswerte erfolgt mit dem in Kapitel 3.1.1 erklärten Mehrwinkelspektrofotometer *Multi FX10* von *Datacolor*. Bei den Messungen wird die Druckrichtung der 80 x 30 mm großen Proben berücksichtigt. Jede Probe wird dreimal vermessen und aus den einzelnen  $\Delta E_H^*$ -Werten der arithmetische Mittelwert gebildet. Die Glanzmessung erfolgt mit dem in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Glanzmessgerät *Vipgloss-1* von *FAG*. Jede Druckprobe wird dabei neun Mal vermessen (je drei Messungen auf derselben Stelle am Probenanfang, in der Probenmitte und am Probenende) und daraus ebenfalls der arithmetische Mittelwert gebildet.

Um die aus den gemessenen Daten berechneten  $\Delta E_H^*$ -Werte der Proben mit visuellen Eindrücken vergleichen zu können, werden Abmusterungsversuche in einem Prüfstand unter denselben Beobachtungs- und Beleuchtungswinkeln wie im Messgerät sowie unter diffuser Beleuchtung (siehe Abbildung 3.8) mit Normlicht D50, was den Einstellungen im Mehrwinkelspektrofotometer entspricht, durchgeführt. Die subjektive Beurteilung der Proben in Abmusterungsversuchen ist aus zwei Gründen von Bedeutung:

1. Subjektive Abmusterungen stellen den Realfall beim Drucken von Effektpigmenten in der Druckindustrie zur Beurteilung der erreichten Effekte dar. Deshalb können auch aus den Ergebnissen dieser nicht den farbmetrischen Normen für Abmusterungen [103] entsprechenden Randbedingungen Erkenntnisse zur Messmitteleignung getroffen werden.
2. Da das Glanzmessgerät FAG Vipgloss-1 nach der DIN-Norm 16537 [71] arbeitet, die 2005 zurückgezogen wurde [73], ist eine generelle Überprüfung der Eignung des Messgeräts zur Glanzbewertung durch subjektive Einschätzungen sinnvoll.



**Abbildung 3.8:** a, b: Prüfstand zur paarweisen Abmusterung der Proben bzgl. des Color-Shift  
c: Visuelle Abmusterung derselben Proben unter diffuser Beleuchtung

Aus den gemessenen Druckproben werden sieben mit *Irodin*<sup>®</sup> [101, 102] und fünf mit *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmenten [25] bedruckte Proben für eine visuelle Abmusterung ausgewählt, deren  $\Delta E_H^*$ -beziehungsweise Glanzwerte  $G$  innerhalb eines möglichst großen Wertebereichs möglichst äquidistante Abstände haben. Zur Beurteilung des Color-Shift finden visuelle Abmusterungen der ausgewählten



sieben (bzw. fünf) Druckproben durch je fünf (bzw. drei) Probanden mit einer zweimaligen (bzw. einmaligen) Wiederholung unter gerichtetem Licht im Abmusterungsprüfstand und unter diffuser Beleuchtung (D50, Leitstand ColorPilot) statt. Die visuellen Abmusterungen zum Glanz werden dementsprechend häufig durchgeführt. Die Bewertung des Color-Shift unter diffuser Beleuchtung erfolgt durch eine Aufreihung der Druckproben entlang eines Lineals zwischen den Längenmaßen 0 und 60 cm. Die Position der Druckproben stellt die empfundene Stärke des Color-Shift dar. Die Beurteilung des Color-Shift unter gerichteter Beleuchtung erfolgt in einer am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren entwickelten Abmusterungskabine [104]. Die Druckproben werden dabei im paarweisen Vergleich mit der jeweiligen Referenzprobe (*Iriodin*<sup>®</sup> oder *Colorstream*<sup>®</sup> Arctic Fire Druckprobe) auf einer siebenstufigen ganzzahligen Notenskala bewertet.

Zur visuellen Beurteilung des Glanzes wird der in Abbildung 3.9 dargestellte Prüfstand verwendet. Die Proben werden den messtechnisch gewonnenen Glanzwerten entsprechend ausgewählt und in einer fünfstufigen Skala in Bezug zu einer Matt- und Glanzreferenz beurteilt. Aus Gründen der Verfügbarkeit der Pigmente und Probanden wurden die *Iriodin*<sup>®</sup> und *Colorstream*<sup>®</sup> Arctic Fire Proben getrennt voneinander abgemustert.

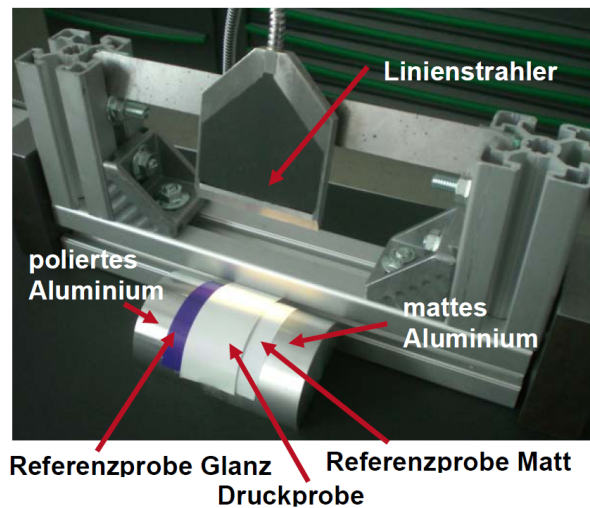
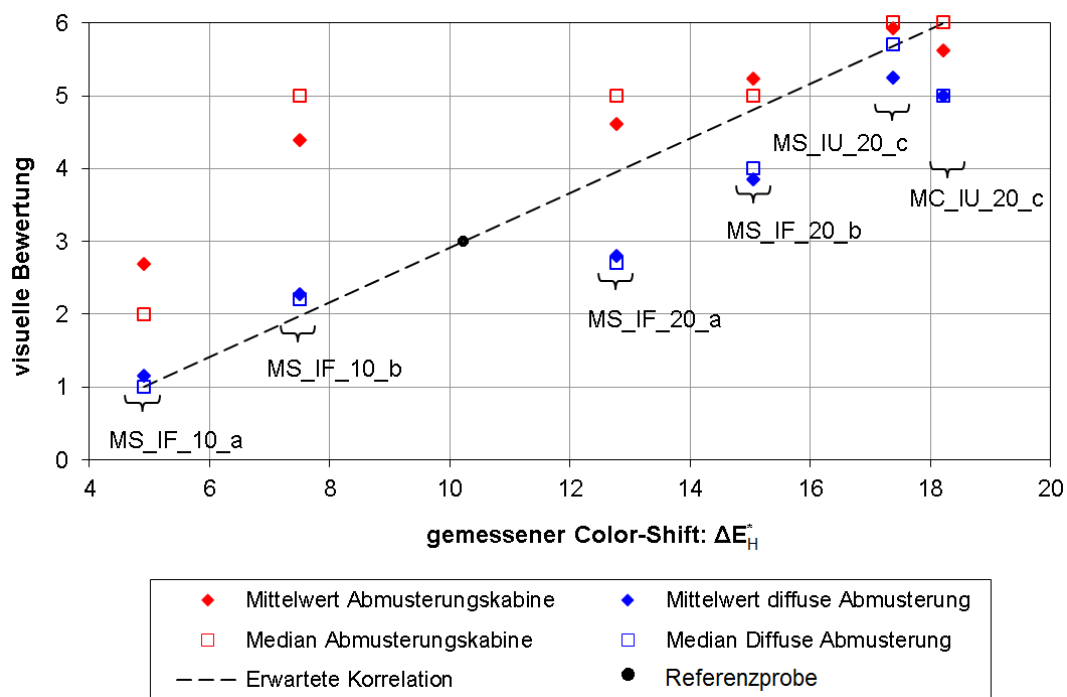


Abbildung 3.9: Abmusterungsprüfstand zur Glanzbewertung

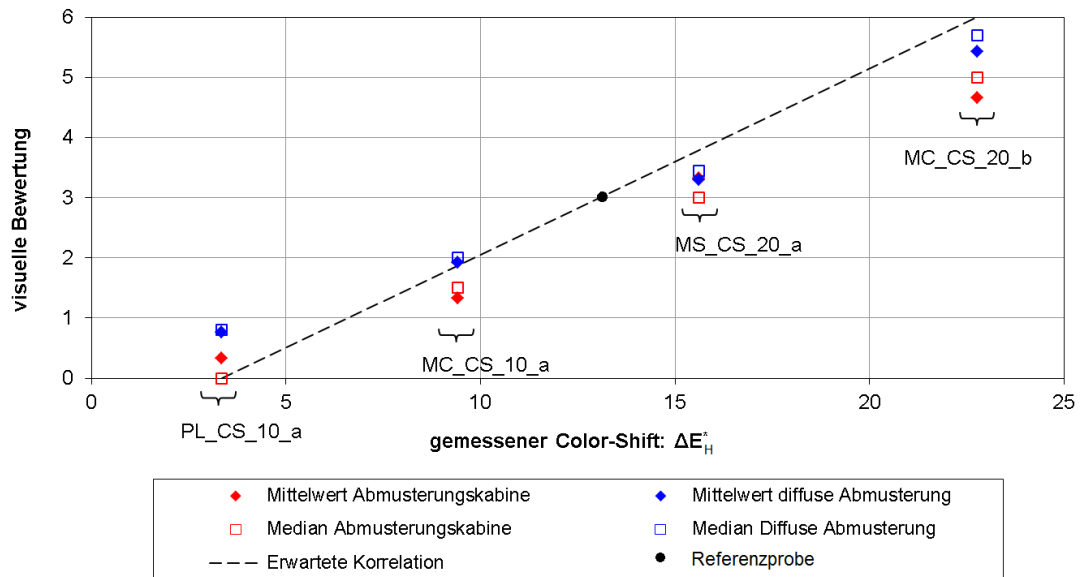
In den Abbildungen 3.10 und 3.11 sind die gemessenen und visuell bewerteten Ergebnisse bezüglich des Color-Shift dargestellt. Die Abkürzungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Es ist festzustellen, dass bei den *Iriodinen*<sup>®</sup> (siehe Abbildung 3.10) der Color-Shift bei den visuellen Bewertungen der Proben in der Abmusterungskabine überwiegend höher eingestuft wird, als aufgrund der gemessenen  $\Delta E_H^*$ -Werte zu erwarten ist. Als zu erwartende Korrelation wird in den Abbildungen 3.10 und 3.11 die Gerade durch die Werte der jeweiligen Referenzprobe (Zuordnung der visuellen Bewertung: 3)

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN



**Abbildung 3.10:** Vergleich der unter gerichteter und diffuser Beleuchtung bezüglich des Color-Shift bewerteten Iridin<sup>®</sup> Proben. Aufgetragen ist der visuell bewertete Color-Shift über dem gemessenen ( $\Delta E_H^*$ ). Zusätzlich eingezeichnet ist die Referenzprobe der visuellen Abmusterung unter gerichteter Beleuchtung (visuelle Bewertung: 3), die zusammen mit der Probe mit dem größten gemessenen Color-Shift ( $MC_{IU20c}$ ) die erwartete Korrelation aufspannt. Die Abkürzungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.



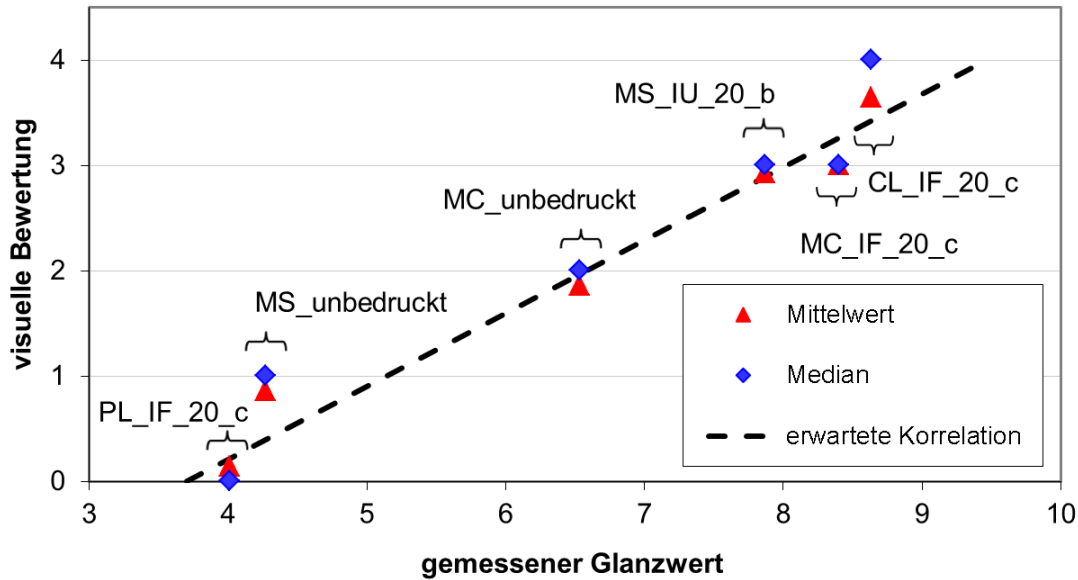
**Abbildung 3.11:** Vergleich der unter gerichteter und diffuser Beleuchtung bezüglich des Color-Shift bewerteten *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Proben. Aufgetragen ist der visuell bewertete Color-Shift über dem gemessenen ( $\Delta E_H^*$ ). Zusätzlich eingezeichnet ist die Referenzprobe der visuellen Abmusterung unter gerichteter Beleuchtung (visuelle Bewertung: 3), die zusammen mit der Probe mit dem größten gemessenen Color-Shift ( $MC_{CS_{20b}}$ ) die erwartete Korrelation aufspannt. Die Abkürzungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

und der Probe mit dem größten gemessenen Color-Shift (Zuordnung der visuellen Bewertung: 6) betrachtet. Ebenfalls liegen die Bewertungen der Abmusterungskabine zum Teil deutlich über den Bewertungen unter diffuser Beleuchtung. Die über alle Abmusterungen und Proben gemittelten Standardabweichungen der visuellen Bewertungen betragen für die *Iriodin*<sup>®</sup> Druckproben bei den Bewertungen der Abmusterungskabine 0,83 und bei der diffusen Abmusterung 0,81 Notenpunkte. Letztere stimmen erstaunlich gut und auch besser als die Bewertungen der Abmusterungskabine mit der erwarteten Korrelation überein. Bei den *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmenten wird der Color-Shift unter diffuser Beleuchtung etwas höher eingeschätzt als in der Abmusterungskabine. Die Differenzen der Bewertungen aus beiden Abmusterungsverfahren sind hier kleiner als bei den Iridinen<sup>®</sup>. Die gemittelten Standardabweichungen betragen für die Bewertungen der Abmusterungskabine 0,78 Notenpunkte und 0,45 für die unter diffuser Beleuchtung abgemusterten Proben. Insgesamt liegen die Werte der diffusen Abmusterung überraschenderweise näher an der erwarteten Korrelation als die der Abmusterungskabine.

Der Vergleich der nach Gleichung 3.1 berechneten  $\Delta E_H^*$ -Werte mit den visuellen Beurteilungen bestätigt die Eignung dieser Größe zur messtechnischen Bewertung des Color-Shift bei gedruckten Effektpigmentschichten. Die gewählte Messmethode für den Color-Shift reicht demnach aus, um das in der Praxis gängige Vorgehen bei der Bewertung von Druckproben hinreichend genau wiederzugeben. Für unsere Zwecke ist damit Messmittelsicherheit für den Color-Shift erfüllt.

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

Die Abbildungen 3.12 und 3.13 vergleichen die messtechnisch ermittelten Glanzwerte mit den Bewertungen der visuellen Abmusterung.



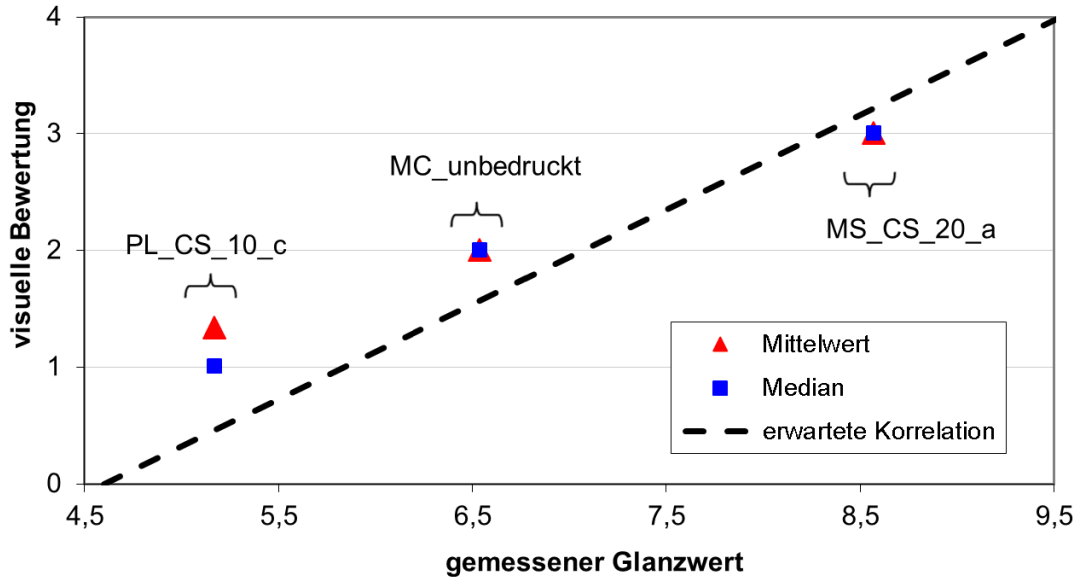
**Abbildung 3.12:** Vergleich gemessener und visuell bewerteter Glanz der Iridin® Proben. Die erwartete Korrelation ergibt sich aus den Glanzwerten der Matt- und Glanzreferenz, die für die visuelle Bewertung die Noten 0 und 4 zugeordnet bekommen. Die Abkürzungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Daraus ist ersichtlich, dass der messtechnisch ermittelte Glanzwert auch dementsprechend visuell nachempfunden wird. Die gemittelten Standardabweichungen betragen bei den Iridin® Proben 0,41 und bei den mit *Colorstream® Arctic Fire* Pigmenten bedruckten Proben 0,16. Wie schon beim Color-Shift, ist auch bei der Glanzbewertung die Streuung bei den *Colorstream® Arctic Fire* Druckproben geringer als bei den *Iridinen®*. Die generell niedrigeren Standardabweichungen bei der Glanzbewertung sind hauptsächlich auf die fünfstufige Bewertungsskala, im Gegensatz zu einer siebenstufigen beim Color-Shift, zurückzuführen.

Diese recht einfachen Versuchsstände zur Abmusterung der mit Interferenzeffektpigmenten bedruckten Proben, sind für unsere Betrachtungen ausreichend, um eine Eignung der Messgeräte zur Quantifizierung der Qualitätsmerkmale Color-Shift und Glanz gewährleisten zu können.

#### 3.2.2 Vergleich der Mehrwinkelspektrofotometer *FX10* und *MA98*

Nachdem gezeigt wurde, dass die Berechnung des  $\Delta E_H^*$ -Werts aus den Messdaten zweier Messgeometrien des Mehrwinkelspektrofotometers *FX10* von *Datacolor* zur Color-Shift Beschreibung ausreichend gut mit den visuellen Bewertungen korreliert, gilt es nun zu untersuchen, ob das zweite Mehrwinkelspektrofotometer *MA98* von *X-rite* gleichwertige Messergebnisse liefert (siehe Abbildung 3.4).



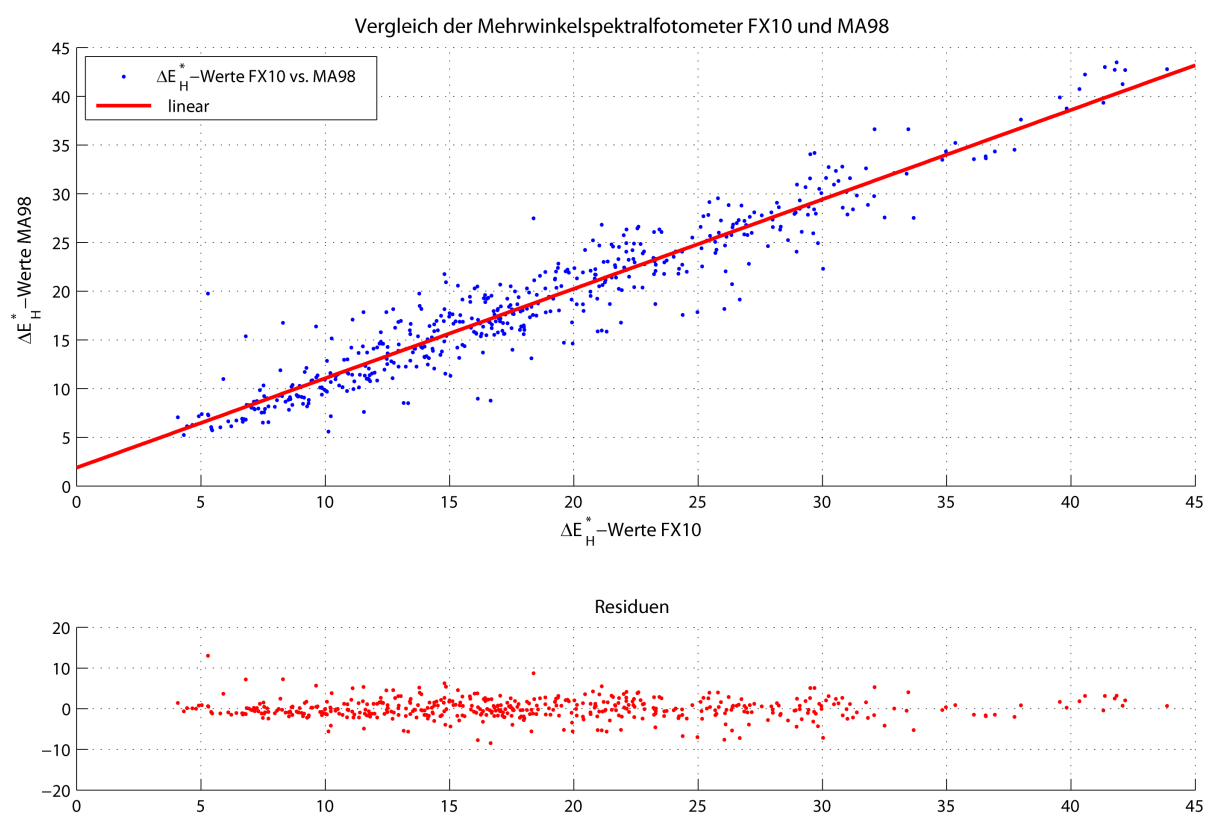
**Abbildung 3.13:** Vergleich gemessener und visuell bewerteter Glanz der *Colorstream® Arctic Fire* Proben. Die erwartete Korrelation ergibt sich aus den Glanzwerten der Matt- und Glanzreferenz, die für die visuelle Bewertung die Noten 0 und 4 zugeordnet bekommen. Die Abkürzungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Da eine Messung mit dem *FX10* deutlich länger (150 s) dauert als mit dem *MA98* (2 s), wird ein Umstieg auf letztgenanntes Gerät für weitere Color-Shift Messungen angestrebt. Um diesen rechtfertigen zu können und dadurch ebenfalls die Messungen des *FX10* zu verifizieren, wurden alle Druckproben, die in Kapitel 5 hergestellt wurden, ebenfalls mit dem *MA98* vermessen. In Abbildung 3.14 sind diese aufsteigend nach den aus den Spektren des *FX10* berechneten  $\Delta E_H^*$ -Werten auf der Abszisse gegenüber den  $\Delta E_H^*$ -Werten, die aus den Messdaten des *MA98* berechnet wurden, auf der Ordinate aufgetragen.

Obwohl bei einzelnen Proben zum Teil deutliche Abweichungen zu erkennen sind, ist der Großteil der Residuen kleiner als  $\Delta E_H^* = 5$ . Residuen sind die Abweichungen zwischen den gemessenen Werten und der an derselben Stelle durch die Regressionsgleichung geschätzten Werte [105]. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression zeigt mit fast 91 % eine deutliche Korrelation beider Messgeräte. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass ebenfalls der mit dem *MA98* bestimmte Color-Shift gut mit den visuellen Eindrücken korreliert.

*Kehren* beschäftigte sich mit denselben Messgeräten und verglich deren Messwiederholbarkeit und Messgenauigkeit [75]. Dazu wurden Messergebnisse der Messgeometrien 3, 4, 7, 8, 9 und 10 aus Abbildung 3.4 berücksichtigt. Sie kam zu dem Ergebnis, dass bei allen Messgeräten Messungen nahe am Glanzwinkel stärker schwanken, als die bei denen der Sensor weiter davon entfernt liegt (größerer Aspektwinkel). Außerdem wurde festgestellt, dass die Wiederholbarkeit von Messungen, die unmittelbar hintereinander durchgeführt werden, größer ist, als die bei denen zwischen den Messungen mehrere Minuten vergehen

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN



**Abbildung 3.14:** Vergleich der Mehrwinkelspektrofotometer. Aufgetragen sind die mit dem *FX10* gemessenen  $\Delta E_H^*$ -Werte gegenüber denen mit dem *MA98* gemessenen. Die Residuen liegen größtenteils unter einem  $\Delta E_H^*$ -Wert von 5. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression beträgt  $R^2 = 0,91$ .

und die Messproben zwischenzeitlich vom Messgerät entfernt wurden. Wird berücksichtigt, dass die Messungen der  $\Delta E_H^*$ -Werte mit dem *MA98* mehr als ein Jahr nach denen mit dem *FX10* durchgeführt wurden, so kann bei einer kurzfristigen Abfolge der Messungen eine noch bessere Korrelation der Messwerte erwartet werden. Einige Abweichungen können vermutlich auch dadurch erklärt werden, dass die Wiederholbarkeitsgenauigkeit bei der Messgeometrie  $45^\circ / 120^\circ$  (Messung nahe am Glanzwinkel) nicht sehr gut ist.

### 3.2.3 Homogenität

Um eine geeignete messtechnische Methode zu finden, die die Homogenität der Druckproben in Übereinstimmung mit den visuellen Eindrücken wiedergibt, werden aus den hergestellten Druckproben 13 ausgewählt und durch paarweise Abmusterungen unter Normlicht D50 nach ihrer Homogenität geordnet (siehe Abbildung 3.15). Die ausgewählten Druckproben beinhalten sowohl solche guter, mittlerer und schlechter Homogenität der gedruckten Effektpigmentschicht. Aus den genannten Gründen werden dazu nicht Proben ohne Unterdruck verwendet, sondern solche mit schwarzem Untergrund.

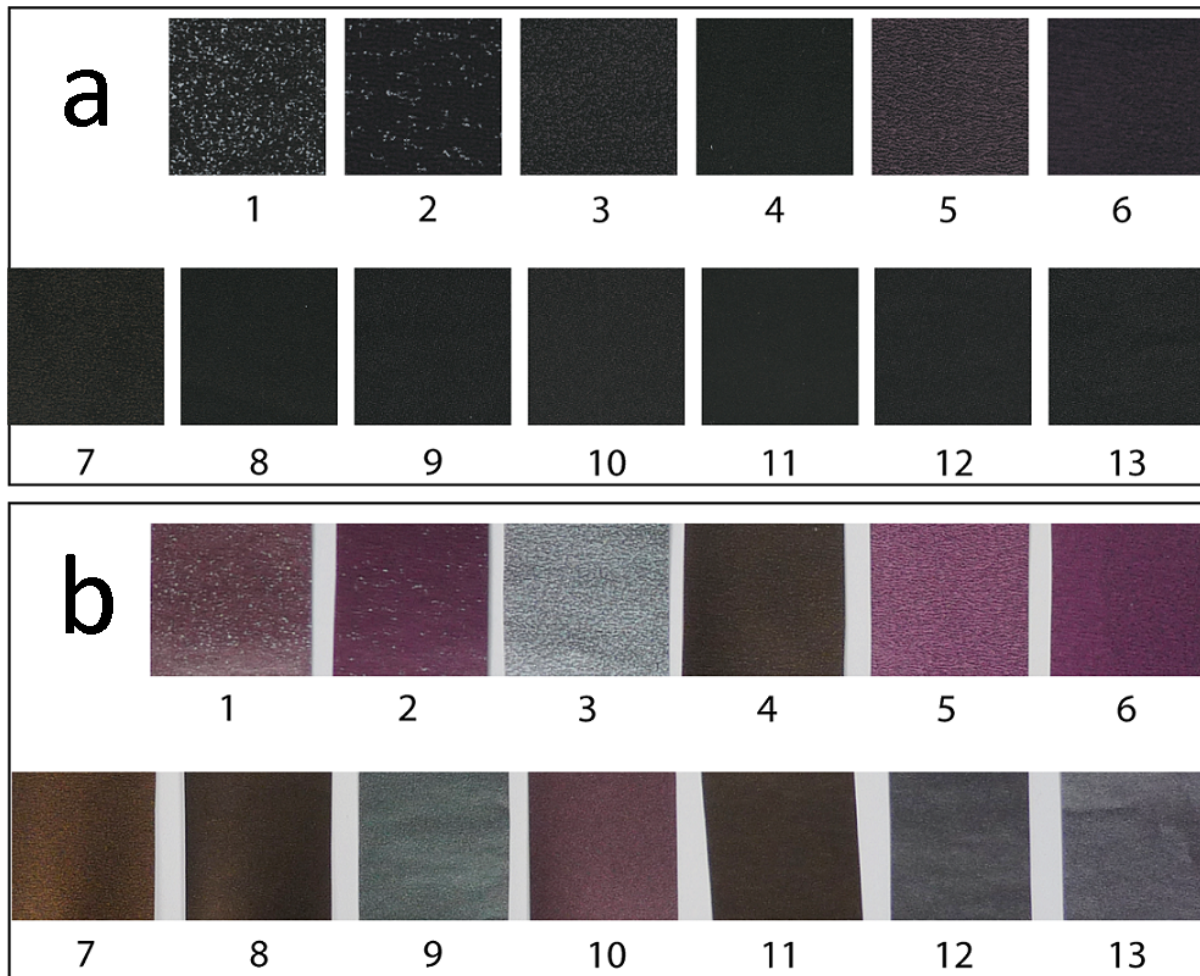
Wird bei den visuellen Abmusterungen von einem Abstand der Probe zum Auge von  $30\text{ cm}$  ausgegangen und berücksichtigt, dass das menschliche Auge im Gesichtsfeld etwa einen Winkel von  $0,4'$  (Bogenminuten) auflösen kann [66], so kann bei einem Gegenstand in dieser Entfernung eine Strecke von  $35\text{ }\mu\text{m}$  gerade noch unterschieden werden, was einer Auflösung von  $725\text{ dpi}$  entspricht. Werden die Druckproben gescannt, so kommt eine Auflösung von  $600\text{ dpi}$  diesem Wert sehr nah und stellt sicher, dass diese mit dem Auge ebenfalls bei der angenommenen Entfernung unterscheidbar wären. Deshalb wurden die ausgewählten Proben mit dieser Auflösung mit dem Scanner *Perfection V750 PRO* von *Epson* eingescannt, ohne geräteseitige Farbkorrekturen zu verwenden und als *Bitmap* gespeichert. Abbildung 3.15a zeigt einen quadratischen Ausschnitt der eingescannten Proben (Gesamtgröße einer Probe:  $1801 \times 501$  Pixel  $\hat{=}$   $7,6 \times 2,1\text{ cm}$  bei  $600\text{ dpi}$ ) mit laut Abmusterung steigender Homogenität von links nach rechts. Darunter (b) sind fotografierte Ausschnitte derselben Proben abgebildet. Die Effektfarben der Proben gehen durch das Scannen komplett verloren. Sowohl die gescannten als auch die fotografierten Druckproben geben die nach der Abmusterung festgelegte Reihenfolge der Homogenität (mit dem Zahlenwert steigend) nicht wider.

Ziel ist es, eine Beschreibung der Schichthomogenität aus den RGB-Daten der 13 gescannten Druckproben zu entwickeln, die die Reihenfolge der visuellen Bewertung möglichst gut wiedergibt. Gelingt dies, so kann diese Methode für alle hergestellten Druckproben angewendet werden, um ein Maß für die Homogenität der gedruckten Effektpigmentschicht zu erhalten.

Dazu wurden in MATLAB verschiedene Ansätze überprüft. *Happel* untersuchte in ihrer Dissertation verschiedene Fokusmaße auf ihre Eignung zur objektiven Messung des Schärfemaßes von Bildern [94]. Um den relativen Grad des Fokus eines Bildes zu bestimmen, wurde dazu eine Funktion in MATLAB genutzt,

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---



**Abbildung 3.15:** Schwarz überdruckt mit Effektpigmentschichten (Maßstab nahezu 1:1). a: Es sind die eingescannten Druckproben in steigender Homogenität (von links nach rechts) nach dem Ergebnis des paarweisen Vergleichs angeordnet. In eingescannter Form erscheint die Homogenität der Effektpigmentschicht der Probe 5 schlechter als durch die abgebildete Reihenfolge dargestellt. b: Vergleichend sind Ausschnitte von Fotos derselben Proben wie in a abgebildet.



die von *Pertuz* implementiert wurde und die verschiedenste Methoden zur Fokusberechnung beinhaltet [106]. Die Funktion berechnet dabei für jede Fokusmethode ein Fokusmaß, das die maximale Bildschärfe beschreibt. Eine logische Folge daraus wäre, wenn bei gleichen Scanner-Einstellungen der gescannten Proben mit steigendem Fokusmaß die Homogenität der gedruckten Effektpigmentschichten sinken würde. Je größer das Fokusmaß des Bildes ist, umso besser gelingt die Unterscheidung unterschiedlicher Bildbereiche und umso inhomogener müsste das Bild erscheinen. In Abbildung 3.16 sind dazu die Kurven der relativen Fokusmaße 26 verschiedener Fokusmethoden über die Probennummern der ausgewählten Proben aufgetragen (vgl. Abbildung 3.15).

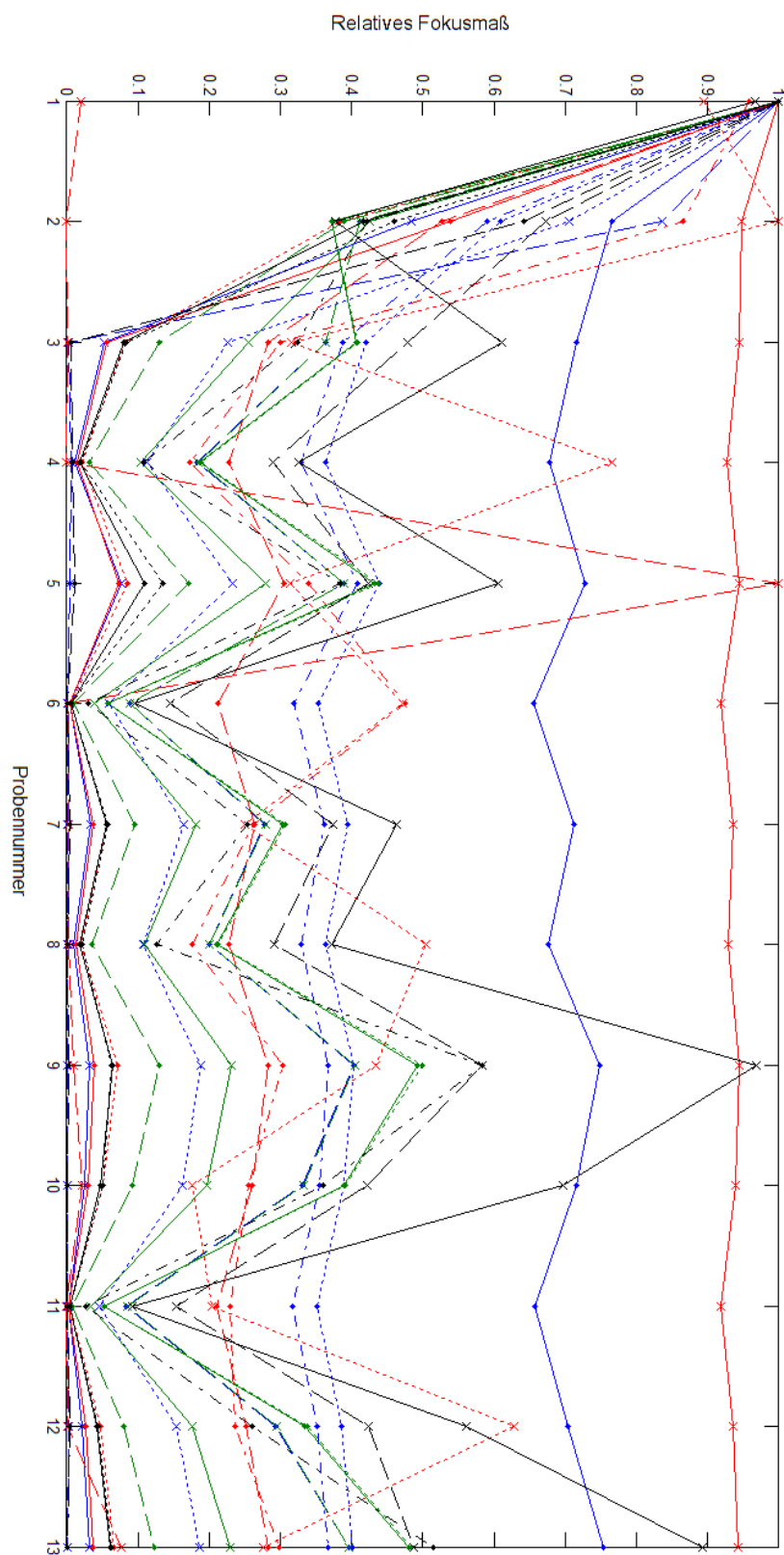
Der Wert der einzelnen Fokusmaße wurde mit MATLAB mit der Funktion von *Pertuz* berechnet, dabei wurde über die Fokusmaße der RGB-Daten der eingescannten Proben gemittelt. Es ist erkennbar, dass die in Abbildung 3.15 relativ inhomogen erscheinende Probe 5 höhere Fokusmaße aufweist als die benachbarten Proben 4 und 6. Insgesamt ist ersichtlich, dass keine der 26 Kurven monoton steigt oder fällt, was für eine Korrelation mit dem Ergebnis der visuellen Abmusterung und damit für eine messtechnische Beschreibung der Homogenität notwendig wäre. Die Verwendung eines Fokusmaßes zur messtechnischen Beschreibung der Homogenität der Proben ist demnach mit dieser Methode nicht zielführend.

Ebenfalls wird eine messtechnische Homogenitätsbeschreibung durch die Standardabweichung  $\sigma_{RGB}$  der Pixelwerte der Probenbilder überprüft, wie sie von *Stahl* am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren erfolgreich für eingescannte Proben, die mit funktionalen Schichten bedruckt wurden, angewendet wird [107]. Für jeden Kanal wird dazu die Standardabweichung der zu einem Zeilenvektor konvertierten digitalen Zählwerte der Pixel berechnet.  $\sigma_{RGB}$  stellt den Mittelwert der Standardabweichungen der RGB-Kanäle dar und wird für jedes Probenbild berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Ein Ausschlag von  $\sigma_{RGB}$  nach oben ist auch hier bei Probe 5 zu beobachten und es liegt keine monoton steigende oder fallende Funktion vor. Daher wird diese Methode der Homogenitätsbeschreibung ebenfalls verworfen.

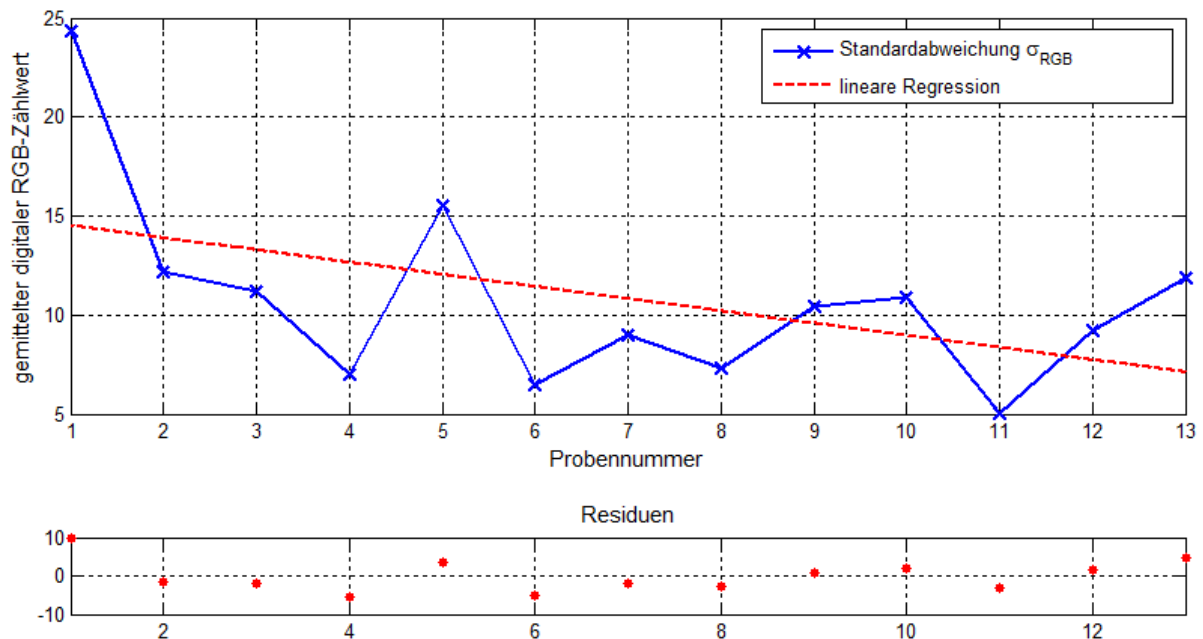
Obwohl bei der Auswahl der Scannereinstellungen auf eine möglichst gute Abbildung der menschlichen Wahrnehmung geachtet wurde, ist nicht auszuschließen, dass bereits die Methode des Einscannens der Proben ungeeignet ist. Diese Vermutung liegt nahe, da wie bereits erwähnt das Bild der gescannten Probe 5 in Abbildung 3.15a deutlich inhomogener erscheint als nach der Abmusterung. Dies ist bei allen überprüften Methoden sichtbar.

Um dennoch eine qualitative Bewertung der Homogenität der gedruckten Effektpigmentschichten zu erhalten, wird auf eine visuelle Abmusterung unter Normlicht D50 zurückgegriffen. Einzelne Druckproben werden von zwei erfahrenen Drucktechnikern in Bezug zu einer guten und schlechten Referenz bezüglich ihrer Homogenität in drei Stufen eingeteilt:

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN



**Abbildung 3.16:** Relative Fokusmaße 26 verschiedener Fokusbildungsverfahren. Aufgetragen sind die relativen Fokusmaße über die Probennummern der ausgewählten gescannten Proben. Die Fokusmaße sind Mittelwerte derer der einzelnen RGB-Daten jedes gescannten Probenbildes.



**Abbildung 3.17:** Homogenitätsbeschreibung durch die Standardabweichung  $\sigma_{RGB}$ .  $\sigma_{RGB}$  ist der Mittelwert der Standardabweichungen der digitalen Zählwerte der RGB-Kanäle. Das Bestimmtheitsmaß einer linearen Regression beträgt nur  $R^2 = 0,23$ , die Residuen schwanken um 10 Zählwerte des gemittelten RGB-Werts.

1 = schlecht  $\Rightarrow$  hohe Wolkigkeit, schlechte inhomogene Druckqualität

2 = mittel  $\Rightarrow$  geringe Wolkigkeit, gering inhomogene akzeptable Druckqualität

3 = gut  $\Rightarrow$  keine Wolkigkeit, homogene gute Druckqualität

Bei der Abmusterung werden ausschließlich Proben gleicher Tonwerte miteinander verglichen und bewertet. Das heißt, dass für jeden unterschiedlichen theoretischen Tonwert der Druckform eine gute und schlechte Referenzprobe eingesetzt wird.

### 3.2.4 Messung der gedruckten Schichtdicken

Die gedruckte Farbschichtdicke ist die wichtigste Größe, um bei Druckprodukten deren Farbwirkung beschreiben und eine Prozesskontrolle durchführen zu können. Diese ist jedoch allgemein sehr schwer zu bestimmen, weil die Papierrauheiten oft die Farbschichten übersteigen (siehe Abbildung 2.18). Viele Methoden zur Schichtdickenmessung sind auch deshalb bei Druckprodukten nicht praktikabel [108]. Im Offsetdruck hat sich die Farbdichtemessung als indirekte Größe zur Schichtdickenbestimmung durchgesetzt (siehe Kapitel 2.3.2). Gravimetrische Messungen - durch Masseunterschiede zwischen einem unbedruckten und bedruckten Substrat - sind bei Druckprodukten, die nicht in Probedruckgeräten hergestellt wurden, sehr schwer realisierbar. Zum einen ändert sich die Masse des Papiers stark mit der Luftfeuchtigkeit,

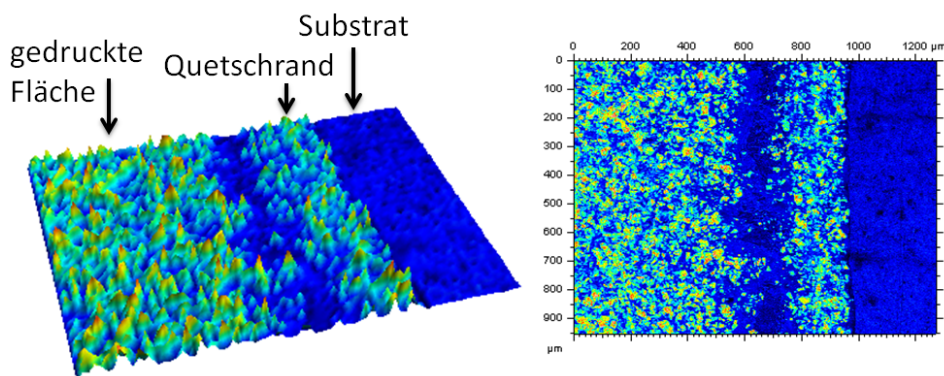
### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---

zum anderen können sich einzelne Papierbogen ebenfalls geringfügig in ihrer Masse unterscheiden. Bei in Rollendruckmaschinen hergestellten Druckprodukten ist es nicht möglich, die Masse des Bedruckstoffs vor dem Bedrucken zu bestimmen.

Zur Schichtdickenmessung steht dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren deshalb ein hochmodernes optisches Profilometer zur Verfügung, das für Schichtdickenmessungen vom Mikrometer- bis zum Nanometerbereich geeignet ist. Der *PLu neox - 3D Optical Profiler* von *Sensofar* [109] vereint die Messmethoden der Konfokal- und Weißlichtinterferometrie sowie der Reflektometrie in einem Gerät. Oberflächen von nicht glatten Papieren, sind jedoch auch damit nicht messbar.

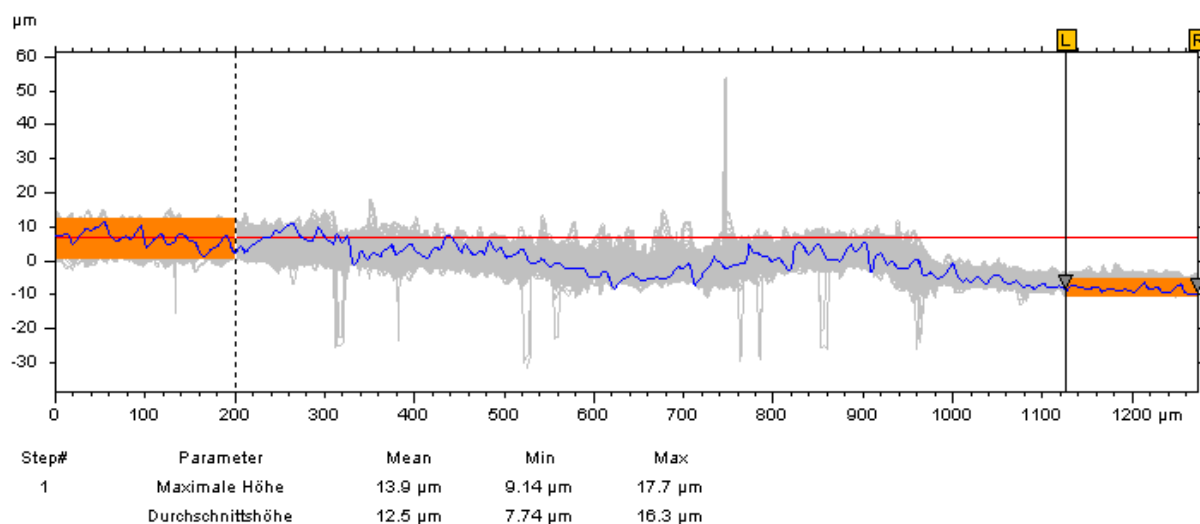
Zur Untersuchung einer möglichen Prozesskontrolle von gedruckten Interferenzeffektfarben werden die Schichtdicken der gedruckten Proben als Referenzwerte benötigt, da sich gezeigt hat, dass diese bei gleichen Pigmentkonzentrationen den Farbeindruck des Druckprodukts bestimmen [15]. Zur Schichtdickenbestimmung wird der Höhenunterschied vom Substrat zur gedruckten Schicht benötigt. Da beim Flexodruck am Rand von gedruckten Flächen sogenannte Quetschränder auftreten, die aus einem erhöhten Farbwulst bestehen, muss über diese "hinweggemessen" werden. Für die Messung von Schichtdicken im  $\mu\text{m}$ -Bereich eignet sich die Konfokalmikroskopie. Um eine möglichst große Fläche zu erfassen, wird eine 10-fache Vergrößerung gewählt (Sichtfeld:  $1,27 \times 0,95 \text{ mm}$ ). Die gedruckten Proben werden bei denselben Geräteeinstellungen so vermessen, dass sowohl ein Bereich der gedruckten Schicht als auch des Quetschrands und des Bedruckstoffs aufgenommen wird (siehe Abbildung 3.18).



**Abbildung 3.18:** Gemessene Bereiche der Druckproben. Teilfläche der gedruckten Schicht, eines Quetschrands und des Substrats aufgenommen mit dem *PLu neox - 3D Optical Profiler*

Damit die Auswertung der gemessenen Proben automatisiert werden kann, wird darauf geachtet, dass immer ungefähr dasselbe Flächenverhältnis der in Abbildung 3.18 dargestellten Bereiche eingehalten wird. Mit der Software *SensoMaps Plus* (Version 5.1.1.5674) werden über die gemessenen Bereiche horizontale Profilschnitte gelegt (siehe Abbildung 3.19). Aus dem durchschnittlichen Höhenunterschied zwischen einem  $150 \mu\text{m}$  langen Bereich des Substrats und einem  $200 \mu\text{m}$  langen der bedruckten Fläche wird die

Schichtdicke berechnet. Um die Reproduzierbarkeit der so gemessenen Schichtdicken der Druckproben beurteilen zu können, wurden mehrere Proben zweimal vermessen (siehe Abbildung 3.20).



**Abbildung 3.19:** Gemittelte Schichtdicke einer gemessenen Probe. Sie wird aus dem durchschnittlichen Höhenunterschied zwischen dem Teilbereich des Substrats (markiert rechts, Länge 150 µm) und dem der bedruckten Fläche (markiert links, Länge 200 µm) über alle horizontalen Profilschnitte (grau dargestellt) der gemessenen Fläche berechnet. In diesem Fall beträgt sie 12,5 µm.

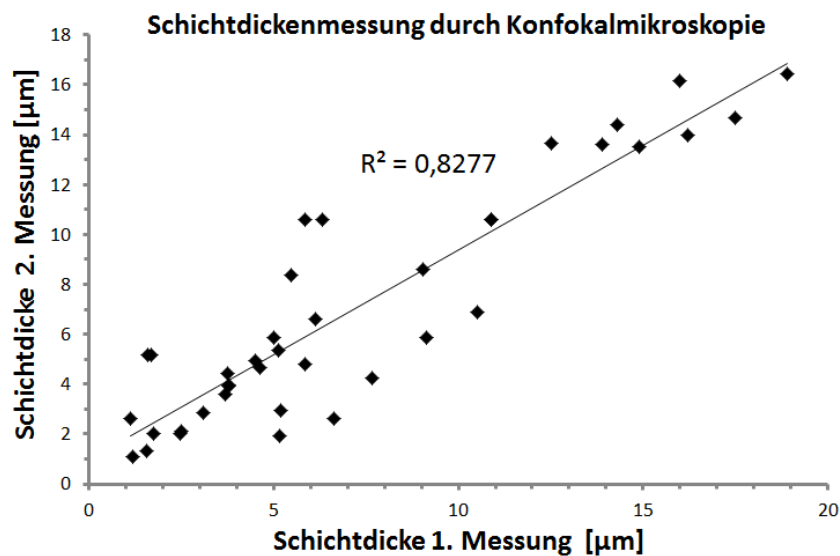
Es ist ersichtlich, dass trotz eines relativ hohen Bestimmtheitsmaßes teilweise Abweichungen von mehreren Mikrometern bei den gemessenen Schichtdicken auftreten. Dies ist auf die nicht exakt gleichen Messstellen verschiedener Messungen zurückzuführen. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Schichtdicken besonders in den Randbereichen stark unterscheiden können. Des Weiteren beeinflusst ebenfalls die durch die Effektpigmente hervorgerufene Schichtrauheit die gemessene Schichtdicke. Nichtsdestotrotz stellt dieses Messvorgehen eine gute Methode zur zerstörungsfreien direkten Schichtdickenmessung gedruckter Effektpigmentschichten dar.

### 3.3 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Qualitätsmerkmale gedruckter Effektpigmentschichten definiert und deren messtechnische Erfassungs- beziehungsweise visuelle Bewertungsmethoden untersucht. Es zeigte sich, dass der Color-Shift und Glanz messtechnisch mit den genannten Geräten und Methoden quantifizierbar ist. Für die Homogenität der gedruckten Effektpigmentschicht konnte keine geeignete messtechnische Quantifizierungsmethode entwickelt werden. Es findet deshalb eine visuelle Bewertung der Druckproben mit einer dreistufigen Notenskala statt (1  $\hat{=}$  schlechte Homogenität, 3  $\hat{=}$  gute Homogenität). Die Messung der Schichtdicke der gedruckten Effektfarben stellte sich als schwer reproduzierbar heraus, da anstelle in der Probenmitte am Rand der gedruckten Flächen gemessen werden muss, um eine Referenz zum Substrat

### 3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN

---



**Abbildung 3.20:** Gegenüberstellung zweimaliger Schichtdickenmessungen derselben Druckproben nach der beschriebenen Methode. Aufgetragen ist die Schichtdicke der 2. Messung über der der ersten Messung. Zusätzlich ist die Gerade der linearen Regression der Messpunkte und das dazugehörige Bestimmtheitsmaß  $R^2$  eingezeichnet.

herstellen zu können. In Abbildung 3.21 sind die Qualitätsmerkmale und ihre Bewertungsmethoden zusammengefasst dargestellt.

Die Messmethoden eignen sich zur Beschreibung der genannten Qualitätsmerkmale, wenngleich die Ergebnisse der visuellen Abmusterung zur Homogenitätsbewertung weiterhin kritisch zu beobachten sind. Die Voraussetzung für eine Bewertung der in Kapitel 5 durchgeführten Versuche nach statistischer Versuchsplanung ist somit gegeben.


Color-Shift	Glanz	Homogenität	Schichtdicke
	 Quelle: <a href="http://www.kesslerdruck.de">http://www.kesslerdruck.de</a>		
  <p>Mehrwinkelspektrofotometer:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multi FX10 von Datacolor</li> <li>- X-rite MA98</li> </ul>	 <p>Glanzmessung: Vipgloss-1 von FAG</p>	 <p>Bewertung der Homogenität der Druckproben: visuelle Abmusterung</p>	 <p>Plu neox 3D Optical Profiler von Sensofar, Konfokalmikroskopie</p>

Abbildung 3.21: Qualitätsmerkmale und ihre Bewertungsmethoden

### **3. QUALITÄTSMERKMALE GEDRUCKTER EFFEKTPIGMENTFARBEN**

---



# Erfahrungen beim Verdrucken von Effektpigmenten

Für das Verdrucken von Interferenzeffektpigmenten gibt die Firma *Merck* als Marktführer in der Herstellung von Effektpigmenten für verschiedene Druckverfahren Empfehlungen heraus [49, 48, 47, 46, 44, 83]. Diese resultieren aus Erfahrungen, die in Zusammenarbeit mit verschiedenen Kunden gewonnen wurden. Sie beantworten nicht alle drucktechnischen Fragestellungen, wie beispielsweise den Einfluss des Trocknens der Druckfarbe und bieten genügend Spielraum für Versuche mit gängigen Druckeinstellungen bei verschiedenen Druckverfahren. Da die Farbkarten in [49, 48, 47, 46, 44] zum Teil selbst nicht mit den entsprechenden Druckverfahren hergestellt wurden, und dadurch weitaus dickere Farbschichten (bis  $250\text{ }\mu\text{m}$ ) aufweisen, als bei den jeweiligen Druckverfahren üblich ist, ist der vermittelte visuelle Eindruck nur schwer mit den Druckergebnissen in der Praxis vergleichbar.

In diesem Kapitel wird dazu auf die Erfahrungen eingegangen, die aus zahlreichen Versuchen hervorgehen. Dies umfasst die Erkenntnisse aus ersten Druckversuchen und die Untersuchung der Einflüsse von unterschiedlichen Tonwerten und Überlackierungen auf diese Effekte.

## 4.1 Erkenntnisse initialer Versuche

Zum Verdrucken von Interferenzeffektpigmenten wurden am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren verschiedene initiale Versuche mit unterschiedlichen Pigmentarten, Bedruckstoffen, Druckverfahren (Flexo-, Offset- und Siebdruck), Druckmaschinen, Farbarten (wasserbasiert und UV-härtend) und variierenden drucktechnischen Parametern durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Abschnitt zusammengefasst:

- Der Einfluss der Luft- und Wärmezufuhr eines Heißluft- und IR-Trockners nach dem Verdrucken bietet wenig Potential für eine Verbesserung des Color-Shift, hat aber andere Vorteile: Bei star-

#### 4. ERFAHRUNGEN BEIM VERDRUCKEN VON EFFEKTPIGMENTEN

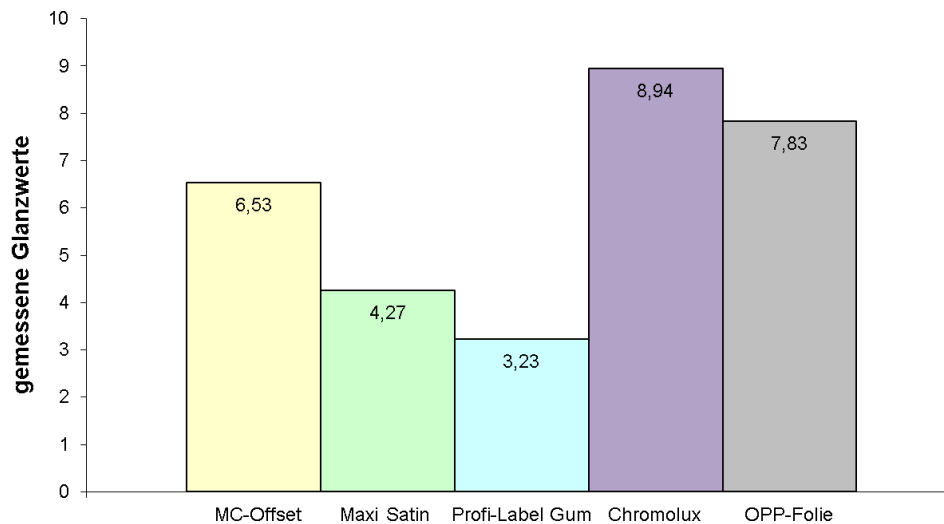
---

ker Luftanströmung im Siebdruck hergestellter Effektpigmentschichten wurde eine visuell sichtbare Wellung der Schichtoberfläche durch partielle Pigmentanhäufungen erzeugt. Dieser Effekt kann für die drucktechnische Herstellung eines Sicherheitsmerkmals, das zusätzlich einen dekorativen Zweck erfüllt, eingesetzt werden. Dazu erfolgte eine deutsche und US-amerikanische Patentanmeldung [110].

- Ein Verdrucken von ihrer Art her ähnlichen Effektpigmenten im Flexo-, Sieb- und Offsetdruck, die sich scheinbar nur durch die abhängig vom Druckverfahren empfohlenen Pigmentgrößen unterscheiden, zeigt deutliche Unterschiede in der Farbwirkung. Dies ist neben den Pigmentgrößen auf die unterschiedlichen Farbschichtdicken zurückzuführen. Dadurch werden gute Möglichkeiten zur Verbesserung des Color-Shift gesehen. Ein Übereinanderdrucken von Effektpigmentschichten verschiedener Druckverfahren bietet ein vergleichsweise kleines Verbesserungspotential und kann Haftungsprobleme der als zweites gedruckten Schicht verursachen.
- Die Pigmentierung hat großen Einfluss auf den Glanz und Color-Shift. Mit steigender Pigmentkonzentration vergrößert sich der Color-Shift, es verringert sich jedoch die Glanzwirkung. Dadurch bietet die Pigmentkonzentration ein großes Potential, um auf diese Effekte einzuwirken.
- Eine Erhöhung der Farbschichtdicke vergrößert den Color-Shift. Im Flexodruck kann dies durch eine höhervolumige Rasterwalze erreicht werden, im Siebdruck durch dickere und gröbere Siebe. Beim Offsetdruck ist der Bereich zur Variation der Schichtdicken verfahrensbedingt sehr eingeschränkt.
- Der Bedruckstoff hat großen Einfluss auf die Effektwirkungen von Interferenzeffektpigmenten.
- Siebdruckversuche mit einem UV-härtenden Bindemittel zeigen nach sehr langer Zeit bis zur Härtung (ca. zwei Stunden) im Vergleich zu einer Härtung nach ca. 40 Sekunden eine leichte Verstärkung des Color-Shift. Da diese Zeitintervalle bis zur Härtung in der Praxis unterschritten werden, kann dadurch kein praxisrelevanter Bezug zu den Effekten gegeben werden.
- UV-Farben weisen im Vergleich zu wasserbasierten Farben einen deutlich größeren Glanz auf, neigen jedoch zum Vergilben bei der Härtungsreaktion. Der Color-Shift ist bei wasserbasierten Farben größer. Des Weiteren wirkt sich bei Wasserfarben im Flexodruck die Variation der Schöpfvolumina der Rasterwalze deutlicher auf den Color-Shift aus als bei UV-härtenden Farben.

Aus den eben genannten Gründen und um die Farbwirkung der Effektpigmente möglichst wenig zu beeinflussen, werden diese in allen folgenden Druckversuchen in einen wasserbasierten transparenten Lack eingemischt. Die Ergebnisse der messtechnischen Auswertungen zum Color-Shift und Glanz aus Kapitel 3.2 bestätigen generell die hier zusammengefassten Ergebnisse. Auf den hohen Einfluss des Bedruckstoffs auf den Glanz sei in Abbildung 4.1 hingewiesen. Das hochglänzende *Chromolux* Papier weist auch ohne

aufgedruckte Effektpigmentschicht bereits einen sehr hohen Glanzwert auf. Eine Steigerung des Glanzes ist daher im Gegensatz zu den anderen Bedruckstoffen kaum mehr möglich.



**Abbildung 4.1:** Glanzwerte der unbedruckten Bedruckstoffe

Zusammenfassend werden für eine Optimierung der durch Effektpigmente hervorgerufenen Effekte die Parameter Pigmentkonzentration, Farbschichtdicke, Pigmentgröße bzw. -art und Bedruckstoff als Haupteinflussfaktoren erkannt. Bezüglich des Color-Shift zeigen sich geringe Wechselwirkungen zwischen Pigmentkonzentration und Pigmentgröße, Schöpfvolumen und Bedruckstoff sowie Schöpfvolumen und Pigmentgröße. Beim Glanz ergibt sich hingegen eine geringe Wechselwirkung zwischen dem Schöpfvolumen und der Pigmentkonzentration. Hohe Wechselwirkungen treten generell nicht auf, was eine Optimierung beider Zielgrößen begünstigt. Aussagen, die die Pigmentgrößen einer Pigmentart betreffen, sind wie in Kapitel 2.1.2 erklärt aufgrund der sehr breiten Verteilung derselben mit Vorsicht zu genießen. Im Folgenden wird deshalb immer von unterschiedlichen Pigmentarten gesprochen. Die genannten Haupteinflussfaktoren müssen in weiterführenden Untersuchungen berücksichtigt werden. Im Folgenden werden Erkenntnisse zum Einfluss von Überlackierungen und Tonwerten auf gedruckte Effektpigmentschichten dargestellt.

## 4.2 Einfluss der Überlackierung

Bei der Veredelung von Druckprodukten ist beim Verdrucken von Effektpigmenten - besonders falls diese in ein wasserbasiertes Bindemittel eingemischt sind - ein Überdrucken mit einer Lackschicht üblich. Dieses hat im Zusammenhang mit den Effektpigmenten folgende Aufgaben (vergleiche [52, 56]):

- Schutz gegen mechanische Belastungen (z.B. Kratzer oder Abrieb)
- Sicherstellung einer problemlosen Weiterverarbeitung

#### 4. ERFAHRUNGEN BEIM VERDRUCKEN VON EFFEKTPIGMENTEN

---

- Hervorrufen bzw. Unterstützung der optischen Effekte

Eine wirksame Überlackierung setzt wiederum eine gute Haftung aller Schichten untereinander und auf dem Bedruckstoff voraus. Die Durchführung eines Scheuertests und einer Gitterschnittprüfung zur Haftungsbeurteilung ergab folgende Ergebnisse:

- Die Haftung auf einer OPP-Folie ist generell schlechter als auf Papier.
- Ein übergedruckter Lack verbessert die Wischfestigkeit des Druckprodukts.
- Die Pigmentkonzentration der Effektpigmente hat kaum Einfluss auf die Haftungseigenschaften der gedruckten Schicht.

Es steht außer Frage, dass eine Überlackierung die von den Effektpigmenten verursachten Color-Shift und Glanz beeinflussen. Es ist jedoch unbekannt, in welchem Maße dies geschieht. Daher werden verschiedene Lacke über eine Schicht mit *Colorstream<sup>®</sup> Arctic Fire* Pigmenten [25] im Offset und Flexodruckverfahren aufgebracht. Der Bedruckstoff (*Maxi Satin*), die Druckgeschwindigkeit ( $40 \frac{m}{min}$ ) und die Pigmentkonzentration (20 %) werden nicht variiert. Als Einflussfaktoren werden der Überdrucklack und der Tonwert der Druckform verändert. Es wird je ein Mattlack für den Offset- und Flexodruck sowie ein kationisch härtender Glanzlack für den Flexodruck eingesetzt. Alle Lacke sind UV-Lacke von der Firma *Weilburger Graphics*. Abbildung 4.2 wurde mit der Software Cornerstone<sup>TM</sup> erzeugt und zeigt den Einfluss der Überlackierung auf den Color-Shift und Glanz.

Bei diskreten Größen erfolgt die Visualisierung der gemessenen Werte in einer Box-Plot Darstellung, die in Abbildung 4.3 erklärt ist. Der obere und untere Whisker stellen entweder, wie in diesem Fall den maximalen oder minimalen Messwert dar, oder sie entsprechen üblicherweise der 1,5 bis 3-fachen Länge des Interquartilabstands (Länge der Box). Liegen beim zweiten Fall alle Werte in der Box, so gibt es keine Whisker.

Da die Boxen im Box-Plot sowohl für den Color-Shift als auch für den Glanz ähnlich groß sind, beschreibt das Modell die Beziehung der Überlackierung zu den beiden Zielgrößen in angemessener Weise. Weil die Boxen bei den Glanzwerten deutlich kleiner sind, kann daraus geschlossen werden, dass durch den Überdruck eines Lacks ein bestimmter Glanzwert sehr genau erreicht wird. Des Weiteren übertrifft die Glanzwirkung der mit dem kationischen UV-Flexolack überdruckten Proben erwartungsgemäß die mit einem Mattlack überdruckten. Letztere glänzen wiederum weniger als die ohne Überlackierung. Gleichzeitig haben die Lacke eine unterschiedliche Wirkung auf den Color-Shift. Während der Glanzlack die  $\Delta E_H^*$ -Werte deutlich senkt, haben die Mattlacke einen geringen Einfluss. Da in dieser Arbeit die Einflüsse unterschiedlicher Materialien und drucktechnischer Einstellungen auf den Color-Shift und Glanz untersucht werden und eine Überlackierung als zusätzlicher Veredelungsschritt betrachtet wird, der diese Einflüsse stark überdecken kann, werden alle weiteren Druckproben ohne eine Überlackierung hergestellt.

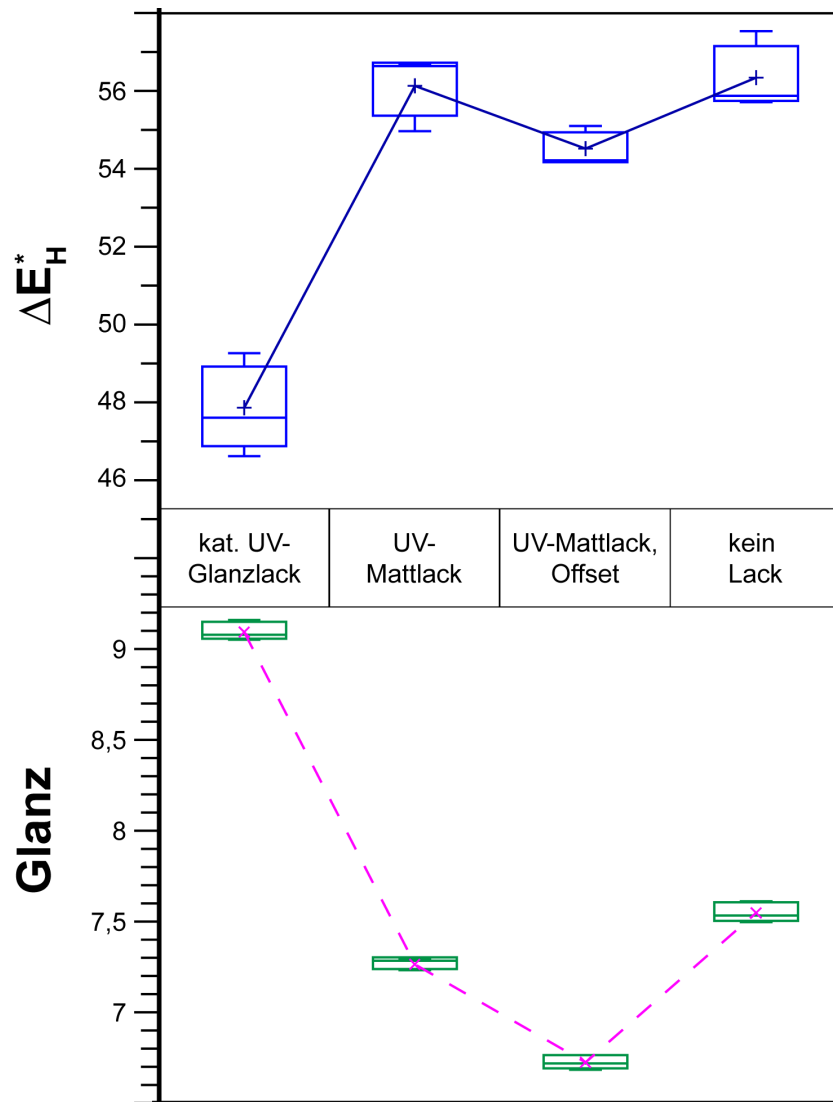


Abbildung 4.2: Einfluss verschiedener UV-härtender Überdrucklacke auf den Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ ) und Glanz

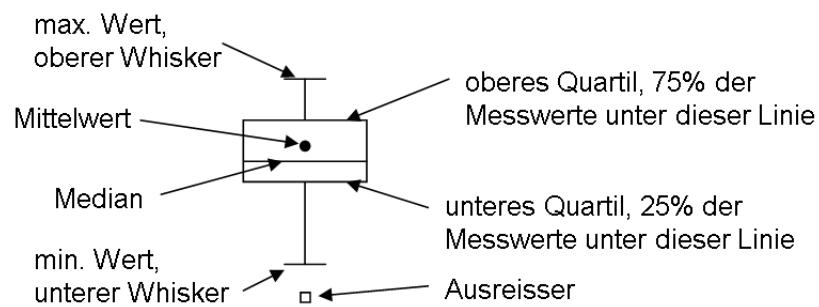


Abbildung 4.3: Darstellung von Messwerten im Box-Plot

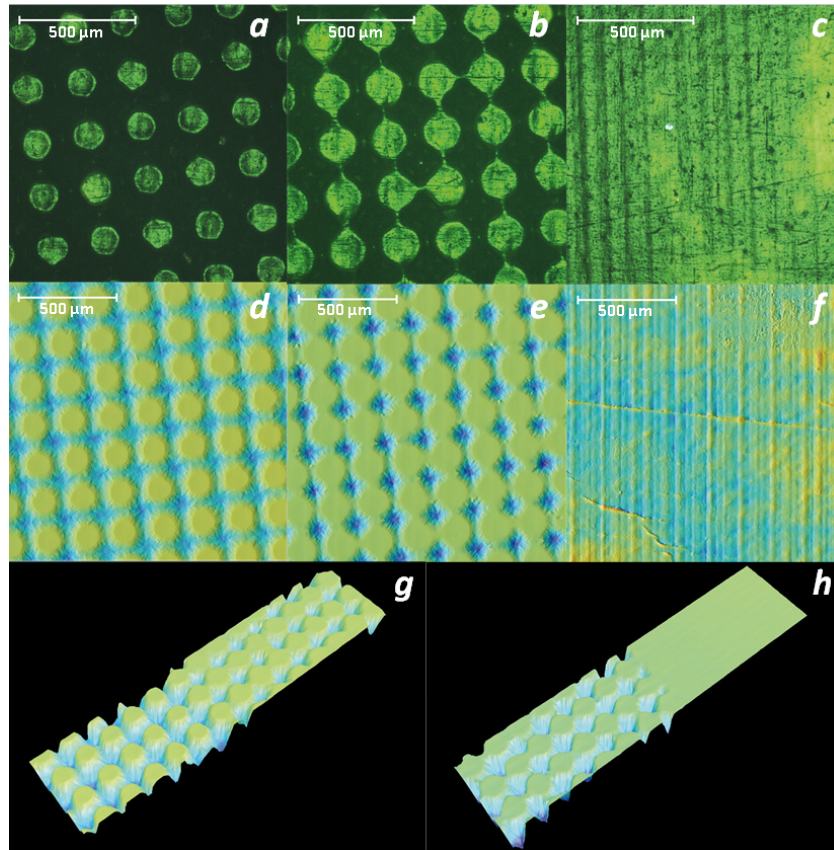
### 4.3 Einfluss unterschiedlicher Tonwerte

Der Einfluss von Tonwerten auf die Effekte Color-Shift und Glanz beim Verdrucken von Effektpigmentfarben wird bisher in der Literatur nicht diskutiert. Die Firma *Merck* empfiehlt für den Flexodruck, unter der Voraussetzung, dass geeignete Rasterwalzen verwendet werden, eine amplitudenmodulierte Rasterung der Druckform mit einer Rasterweite von  $21 \frac{\text{Linien}}{\text{cm}}$  [83]. Frequenzmodulierte Rasterungen werden aufgrund der plättchenförmigen Pigmente nicht empfohlen.

Ohne die Verwendung neuartiger Rasterwalzengravurarten (ART<sup>™</sup> von *Praxair* oder H.I.T. von *Zecher*) wird vom Einsatz unterschiedlicher Tonwerte beim Verdrucken von Effektpigmentfarben abgeraten [83]. Die Verwendung dieser Gravurarten ist speziell für das Verdrucken von Effektpigmentfarben wichtig, da sich diese aufgrund ihrer Größe in den Nöpfchen einer herkömmlichen Rasterwalze leicht festsetzen können. Den Pigmenten wird dadurch ebenfalls mehr Raum für deren Ausrichtung gegeben. In *Pfaff* [1] werden Halbtöne nur für glatte Bedruckstoffe und Pigmentgrößen bis maximal  $60 \mu\text{m}$  empfohlen. Eine Aussage über maximale Pigmentgrößen ist jedoch sehr schwierig, da die Herstellerangaben nur die D10 und D90 Werte umfassen [28, 29, 26, 27]. Üblicherweise werden Effektpigmentfarben im Flexodruckverfahren mit Vollflächen verdruckt. Ein Argument, das gegen den Einsatz von unterschiedlichen Tonwerten spricht, ist die fehlende Langzeitstabilität des Flexodruckprozesses. Die Pigmente würden nach einiger Zeit die Druckform (Flexoklischee) aufgrund der Trocknung auf derselben zusetzen, was die Druckqualität beeinträchtigt. Strukturierte Druckformen begünstigen aufgrund ihrer größeren Oberfläche dieses Phänomen, das bei den bisherigen Versuchen aufgrund ihrer kurzen Druckdauer nicht beobachtet werden konnte.

Viele Anwender verdrucken daher Effektpigmentfarben bevorzugt im Tiefdruckverfahren. Der Tiefdruckzylinder lässt durch die ständige Einfärbung ein Antrocknen der Farbe kaum zu, was homogener gedruckte Schichten begünstigt. Die Auswirkungen auf die Effekte von 50 und 70 %igen Tonwerten im Vergleich zu einer gedruckten Volltonfläche wurden im Flexodruckverfahren untersucht. In Abbildung 4.4 sind Mikroskopaufnahmen von Feldern der Tonwerte 50, 70 und 100 % einer Flexodruckform dargestellt. Bei der Vollfläche sind mit dem Konfokalmikroskop vertikale Linien zu erkennen, die durch einen Laser bei der Druckformherstellung entstanden sind (siehe Abbildung 2.11). Durch den Einsatz einer H.I.T.-gravierten Rasterwalze wird ein Zusetzen derselben nicht erwartet. Die Empfehlungen des Pigmentherstellers werden damit ebenfalls eingehalten.

Im Siebdruck hergestellte Proben zeigen eine deutliche Verringerung der übertragenen gedruckten Schicht bei Tonwerten kleiner als 80 % (siehe Abbildung 4.5). Dieser Effekt kann auf ein ungünstiges Verhältnis von Pigmentgröße, Maschenweite und Rasterung zurückgeführt werden. In theoretischer Form kann dies unter der Annahme einer gemittelten mittleren Pigmentgröße von  $24,5 \mu\text{m}$  (vergleiche [27]), einer sich im Verhältnis zur Rasterung verringernden Maschenweite des Siebes und unter der Einhaltung der

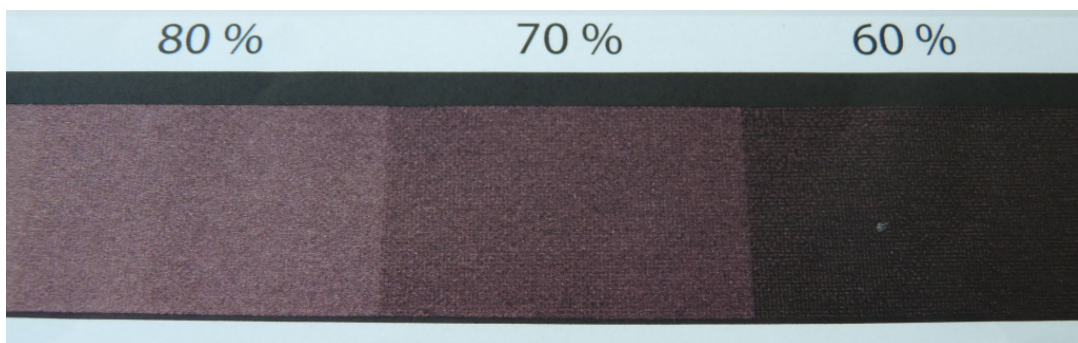


**Abbildung 4.4:** Aufnahmen unterschiedlicher Tonwerte (von links nach rechts 50 %, 70 %, 100 %) einer Druckform für das Verdrucken von Effektpigmenten (aufgenommen mit Konfokalmikroskop 10-fache Vergrößerung [109])

a-c: Druckform auf dem Formzylinder aufgeklebt

d-f: Druckform nach Abziehen vom Formzylinder

g-h: 3D-Ansicht von Feldübergängen, g: von 50 auf 70 %, h: von 70 auf 100 %



**Abbildung 4.5:** Verschiedene Tonwerte im Siebdruck verdruckter Effektpigmentfarbe

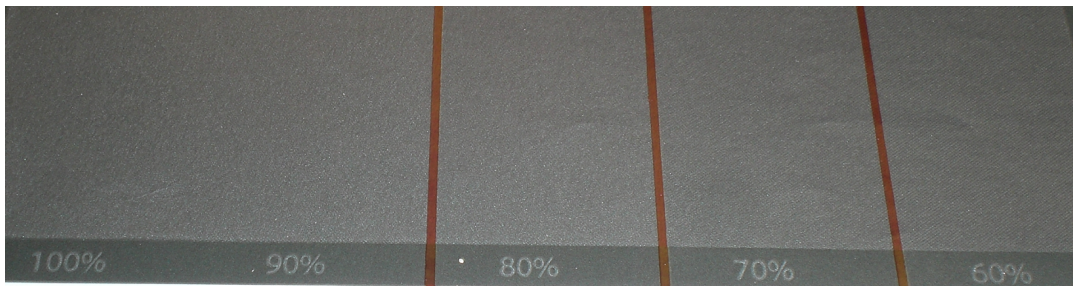
#### 4. ERFAHRUNGEN BEIM VERDRUCKEN VON EFFEKTPIGMENTEN

---

Empfehlungen für das Drucksieb [44]

$$\begin{aligned}\text{Maschenweite des Siebes} &= f \cdot \text{maximale Pigmentgröße} \\ \text{mit } f &= 1,5 \dots 2,5\end{aligned}$$

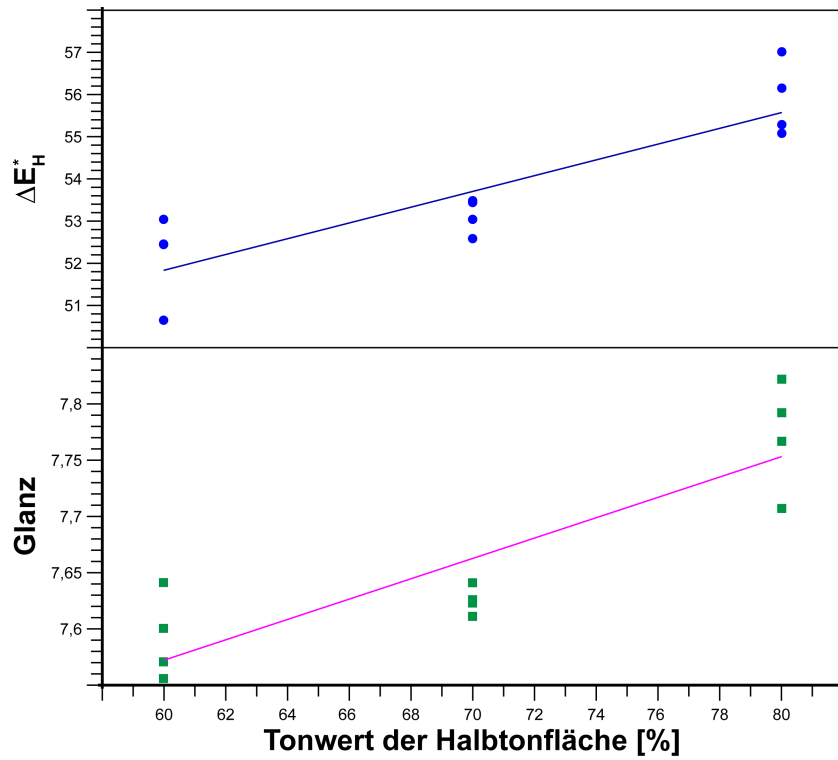
nicht vollständig erklärt werden. Danach dürften nur die größten Pigmente ab Tonwerten von 80 % oder kleiner die Maschen nicht durchdringen, deren Anzahl jedoch kleiner als 10 % der gesamten Pigmente sein sollte. Ein großer Unterschied beim Color-Shift sollte laut dieser Argumentation nicht zu beobachten sein. Aussagen zu den tatsächlichen Pigmentgrößen sind, wie schon mehrfach erwähnt, aufgrund ihrer breiten Verteilung schwierig, wodurch die Richtigkeit der oben getroffenen Annahmen angezweifelt werden kann. Eine starke Abhängigkeit der Druckprodukte vom gewählten Tonwert kann im Flexodruck nicht immer beobachtet werden (siehe Abbildung 4.6). Die Unterschiede bei den gedruckten Schichten sind hier deutlich geringer als in Abbildung 4.5, während bei den Proben diejenigen mit mit 70 %igen Tonwerten als die homogensten auffallen. In späteren Versuchen wurde eine deutliche Beeinflussung der Homogenität der gedruckten Schichten durch die Druckgeschwindigkeit festgestellt, wobei sich hohe Druckgeschwindigkeiten ( $> 50 \frac{m}{min}$ ) positiv auf die Homogenität auswirken.



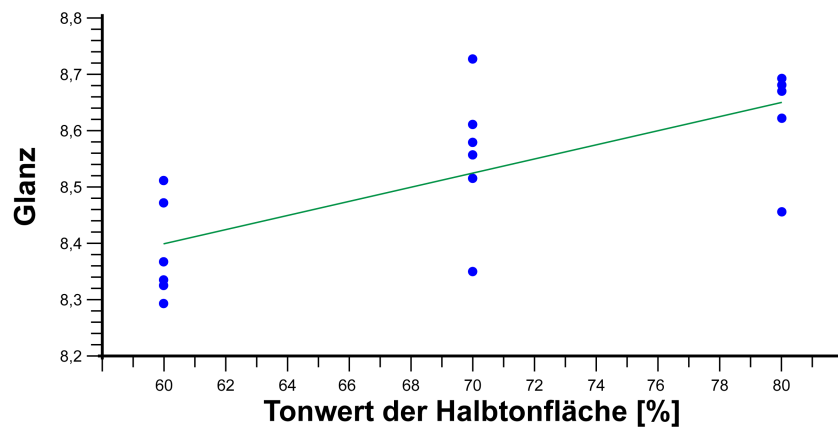
**Abbildung 4.6:** Verschiedene Tonwerte verdruckter Effektfarben im Flexodruck

Bei Druckversuchen wurde lediglich ein geringer Einfluss der Tonwerte festgestellt. Die Einflüsse der Tonwerte auf den Color-Shift und Glanz der Druckproben des Versuchs mit Lacküberdruck (vgl. Kapitel 4.2) sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Die eingezeichneten Geraden sind die linearen Regressionen aus den Messpunkten. Dabei beträgt das Bestimmtheitsmaß der Regression für den  $\Delta E_H^*$ -Wert  $R^2 = 92,8 \%$  und für den Glanz  $R^2 = 99,7 \%$ . Ein weiterer Druckversuch ohne Überdrucklacke bei Variation des Bedruckstoffs (*Maxi Satin* und OPP-Folie), des Tonwerts (60, 70 und 80 %) und der Rasterweite der Druckform (28, 40 und  $60 \frac{Linien}{cm}$ ) ergibt nur einen statistisch signifikanten Einfluss des Tonwerts auf den Glanz. Dieser ist, wie in Abbildung 4.8 ersichtlich, ebenfalls gering. Der Color-Shift wird nicht signifikant beeinflusst. Die Rasterweite der Druckform zeigt ebenfalls keine signifikanten Einflüsse.





**Abbildung 4.7:** Druckversuch inklusive Lacküberdruck. Geringer Einfluss des Tonwerts auf den Color-Shift und Glanz



**Abbildung 4.8:** Druckversuch ohne Lacküberdruck. Geringer Einfluss des Tonwerts auf den Glanz

#### 4. ERFAHRUNGEN BEIM VERDRUCKEN VON EFFEKTPIGMENTEN

---

Insgesamt sind mit Halbtönenflächen im Vergleich zu Vollflächen homogenere Schichten zu beobachten, die kaum Quetschränder aufweisen und somit die Druckqualität verbessern. Weiterhin besteht bei einem möglichen geringeren Farbauftrag durch Halbtönenflächen ein Einsparungspotenzial bezüglich der Farbe bei gleichbleibenden Effekten. Da dies ein Teilziel dieser Arbeit ist, wird die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Tonwerte in Kapitel 5 fortgesetzt.

Durch die Erfahrungen aus den Vorversuchen ist jetzt das Basiswissen vorhanden, um eine Versuchsreihe mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung sinnvoll aufstellen zu können.

## 5

# Eruierung der Haupteinflussfaktoren mithilfe der statistischen Versuchsplanung

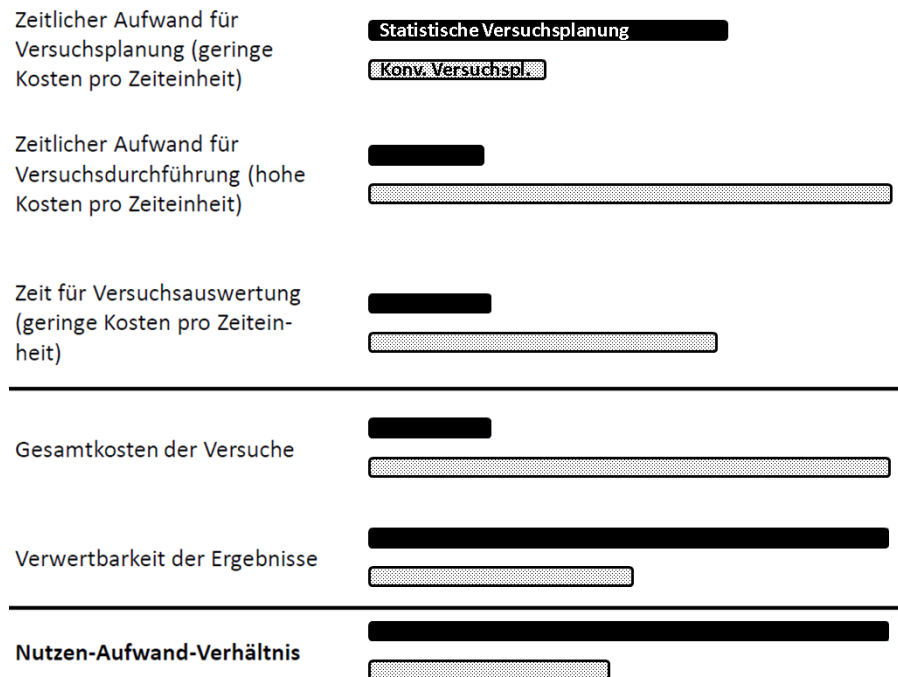
Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Versuchsreihe ist die Untersuchung wesentlicher Einflüsse auf die in Kapitel 4 erklärten Qualitätsmerkmale (Zielgrößen) Color-Shift, Glanz und Homogenität der gedruckten Effektpigmentschicht. In Kapitel 4 wurden Erfahrungen für das Verdrucken von Effektpigmenten gesammelt, die in die Planung einer Druckversuchsreihe mit dem Flexodruckverfahren auf einer modularen Rollendruckmaschine nach der Methode der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) einfließen. Diese bietet im Gegensatz zu einer konventionellen Versuchsplanung die Möglichkeit zur systematischen Planung und Auswertung von Versuchen. Des Weiteren ist eine hohe Effizienz bei der Durchführung der Versuche möglich, da die Mehrkosten bei der Planung gewöhnlich durch die weitaus geringeren Kosten bei der Versuchsdurchführung mehr als kompensiert werden. Abbildung 5.1 zeigt einen Vergleich der statistischen Versuchsplanung mit der konventionellen Versuchsplanungsmethode, bei der immer nur ein Parameter gleichzeitig variiert wird.

Es ist ersichtlich, dass das Nutzen-Aufwand-Verhältnis, das die Gesamtkosten und die Verwertbarkeit der Ergebnisse beinhaltet, deutlich zu Gunsten der statistischen Versuchsplanung ausfällt. Diese Vorteile sollen in der zu planenden Versuchsreihe ausgenutzt werden. Dazu wird das Ziel und der Ablauf der statistischen Versuchsplanung kurz erläutert und im Anschluss die Phasen der

- Versuchsplanung (Kapitel 5.2)
- Versuchsdurchführung (Kapitel 5.3)
- Versuchsauswertung (Kapitel 5.4)

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---



**Abbildung 5.1:** Qualitativer Vergleich statistischer und konventioneller Versuchsplanung anhand des Nutzen-Aufwand-Verhältnisses (schwarz: Statistische Versuchsplanung, hell: Konventionelle Versuchsplanung) [111]

vorgestellt.

Da die statistische Versuchsplanung in dieser Arbeit als Werkzeug zur Lösung eines ingenieurmäßigen Problems dient, wird auf eine detaillierte Darstellung dieser Methode verzichtet. Es wird das Ziel verfolgt, mit möglichst wenig Versuchen eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem Color-Shift, Glanz und der Homogenität der Druckproben sowie den Materialeigenschaften und den drucktechnischen Parametern zu schaffen [105]. Bei Interesse an einem tiefgreifenderen Einblick in die Methode der statistischen Versuchsplanung und ihrer zugrunde liegenden mathematischen Konstrukte, sei auf die angegebene Literatur verwiesen (z.B. [100, 112, 113, 105]).

Für die Umsetzung wird die Software *Cornerstone<sup>TM</sup>* Version 5.0 verwendet, die neben einem umfangreichen Versuchsplanungsteil mit umfassenden Statistikpaketen ausgestattet ist, und damit ein großes Anwendungsspektrum zur Planung und Auswertung von Versuchen und zur statistischen Datenanalyse bietet [112]. Im Zuge der Versuchsplanung wird unter anderem die modulare Rollendruckmaschine *Gallus RCS330-HD* als Versuchsplattform für die Druckversuche vorgestellt (siehe Abbildung A.2 im Anhang A). Die Versuchsauswertung erfolgt durch eine Regressionsanalyse auf Basis der Ergebnisse, die durch die Realisierung der statistisch geplanten Versuche generiert wurden. Abschließend erfolgt eine Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse, eine Kostenabschätzung und daraus abgeleitete Empfehlungen für den Anwender.

## 5.1 Ziel und Ablauf

Die statistische Versuchsplanung, auch Design of Experiments (DoE) genannt, hat sich erst in den 80er Jahren als Methode zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen weltweit durchgesetzt [100], obwohl diese bereits in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt wurde [114]. Sie gilt als eine mächtige Methode, um neue Prozesse zu erforschen, bestehende Prozesse besser zu verstehen und diese zu optimieren, um eine herausragende Effizienz und Güte zu erreichen [113]. Sie ist ein geeignetes Hilfsmittel, um die Anzahl der benötigten Versuchsläufe auch für komplexe Systeme klein zu halten, und trotzdem aussagekräftige Modelle zu erhalten [105].

Besonders in der Motorenentwicklung bestand aufgrund der gesetzlichen Anforderungen bezüglich des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen sowie der Kundenwünsche nach Fahrdynamik, Komfort und Sicherheit sehr früh die Notwendigkeit für ständige Weiterentwicklungen. Dabei stieg die Anzahl der Einstellparameter und deren Wechselwirkungen zueinander stark an, was zu einem mehrdimensionalen Optimierungsproblem führte [115]. Die Durchführung vollfaktorieller Versuchsreihen mit der Variation nur jeweils eines Parameters wurde daher unmöglich. Daher ist die statistische Versuchsplanung ein in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung häufig eingesetztes Instrument zur Reduzierung des Versuchsaufwandes und zur Erstellung und Validierung von Simulationsmodellen.

Ziel ist es, Versuche so zu planen, dass die gewünschte Information mit einem möglichst minimalen Zeit- und Kostenaufwand generiert werden kann [112]. Es können dadurch viele Einflussparameter oder nicht-lineare Zusammenhänge mit vertretbarem Aufwand untersucht werden [100].

In der Drucktechnik existiert ebenfalls eine Vielzahl an Einflussparametern. Das beginnt bei der großen Anzahl an verwendeten Bedruckstoffen (Folien, Papiere, Kartonagen), Farben, Druckformen, Gummütüchern, Rasterwalzen und endet mit den unterschiedlichsten Einstellungen der Druckmaschinen für verschiedene Druckverfahren. Die ersten Faktoren werden in dieser Arbeit als Materialparameter, die zweiten als drucktechnische Parameter oder Einstellungen bezeichnet. Die Anwendung der statistischen Versuchsplanung in der Drucktechnik erscheint auch aus maschinentechnischer Sicht sinnvoll, da Einflüsse der drucktechnischen Einstellungen auf das Druckergebnis von Maschine zu Maschine unterschiedlich sein können. Dies erschwert ebenfalls ein "Upscaling" von Labor- auf Produktionsdruckmaschinen. Abgesehen davon beeinflussen beim Drucken unterschiedlichste physikalische Effekte die Ausbildung und Qualität der gedruckten Schicht (siehe Abbildung 2.12).

Die statistische Versuchsplanung ermöglicht es, trotz gleichzeitiger Variation mehrerer Faktoren, eine eindeutige Zuordnung einzelner Größen zu bestimmten Effekten zu leisten. Damit wird die Gesamtanzahl der durchzuführenden Druckversuche deutlich reduziert und deren Planung systematisiert. Eine zeitraubende in der Druckbranche weitgehend übliche "Trial and Error"-Vorgehensweise wird somit verhindert.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

Außerdem lassen die durch die Auswertung der geforderten Versuche erhaltenen Regressionsmodelle Vor-ausberechnungen und die Durchführung von Optimierungen bezüglich der Zielgrößen zu. Je nach Qualität der Regression ist es somit möglich, die drucktechnischen Einstellungen und die Materialkombinationen für bestimmte Effekte zu prognostizieren. Der Druckprozess wäre somit - zumindest teilweise - durch ein mathematisches Modell beschreibbar, wodurch ein Beitrag zum langfristigen Ziel des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren geleistet werden könnte.

Während die statistische Versuchsplanung bei *Heidelberger Druckmaschinen* breite Anwendung findet, wird sie trotz ihrer offensichtlichen Vorteile bei vielen anderen Druckmaschinenherstellern nicht eingesetzt. Dies hat folgende Gründe:

- Drucken ist von Erfahrung und empirischer Vorgehensweise geprägt. Die statistische Versuchsplanung erfordert ein systematisches Vorgehen und die Durchführung scheinbar nicht zusammenhängender, unlogisch zusammengestellter Versuche.
- Zur Planung und Auswertung der Versuche wird eine Software benötigt, die eine gewisse Erfahrung in der Benutzung, bei der Festlegung der Versuchspläne und bei der Interpretation der Ergebnisse voraussetzt.
- Die Auswertung basiert auf statistischen Verfahren, deren Beherrschung viele zusätzlich abschreckt.

Deshalb hat sich die statistische Versuchsplanung in der graphischen Industrie bisher nur bei wenigen Firmen etabliert.

Abbildung 5.2 veranschaulicht die Abfolge der einzelnen Schritte, die bei der statistischen Versuchsplanung durchzuführen sind. Diese werden bei der folgenden Umsetzung immer im Zusammenhang mit der gegebenen Problemstellung betrachtet. Die Theorie der Methode der statistischen Versuchsplanung wird, soweit diese zum Verständnis notwendig ist, Schritt für Schritt einbezogen.

### 5.2 Versuchsplanung

Wie aus Abbildung 5.2 erkennbar, nimmt die Planung bei der statistischen Versuchsplanung den wichtigsten Teil ein. Wurden bei diesem Schritt Faktoren, Wechselwirkungen, Störgrößen oder Umgebungsbedingungen unzureichend berücksichtigt, so können diese nur durch zusätzliche Versuche im Nachhinein in das Modell einbezogen werden. Vor der Durchführung einer statistischen Versuchsplanung ist daher ein fundiertes Wissen über den zu untersuchenden Themenbereich erforderlich. Aus diesem Grund haben die in Kapitel 4 beschriebenen Voruntersuchungen stattgefunden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Planungsphase der statistischen Versuchsplanung durchgeführt und dabei auf den Versuchsaufbau und die Druckmaschine eingegangen.

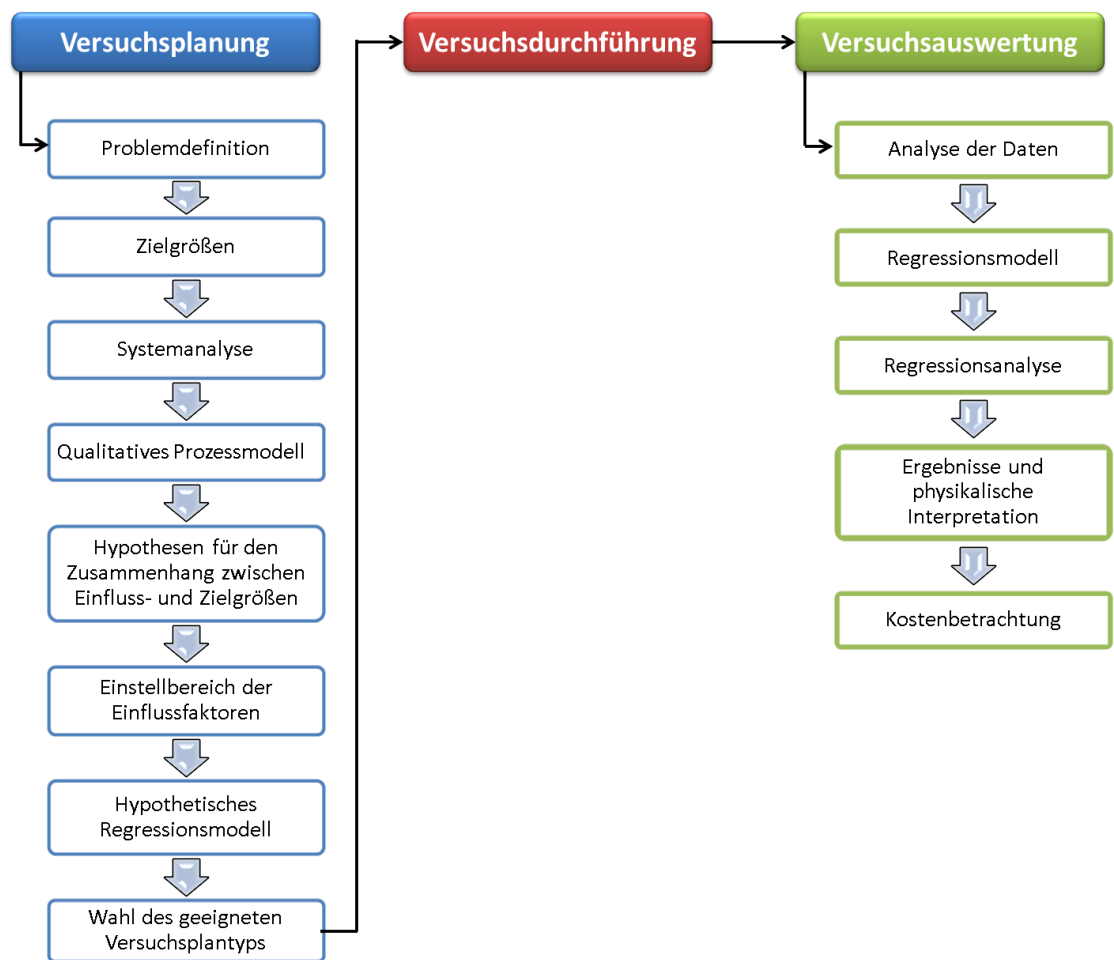


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des Ablaufes der statistischen Versuchsplanung (vgl.[111])

### 5.2.1 Problemdefinition

Bei der Problemdefinition wird das Ziel eines Versuches festgelegt. Dazu sind spezifische Fragestellungen an das System zu stellen, die es durch die späteren Versuchsergebnisse zu beantworten gilt. Die Grundgedanken dazu wurden bereits in den Kapiteln 1 und 2 dargestellt. Sie spiegeln die Motivation für diese Arbeit aus der Sicht eines Druckmaschinenherstellers wider, der besonderen Wert auf Kundenzufriedenheit und Service legt. Dabei ist es von zunehmender Bedeutung, seinen Kunden Anwendungshinweise für einen optimalen Einsatz der Druckmaschinen und der verwendeten Materialien bieten zu können. Da das Verdrucken der relativ teuren Effektpigmente in den Lackierwerken von Bogenoffsetmaschinen an Bedeutung gewinnt, soll ein Einsparungspotenzial bezüglich drucktechnischer und materialspezifischer Parameter erkannt werden. Die Fragestellung an das System Flexodruck lautet deshalb: Wie können durch optimale Wahl der Einflussfaktoren Interferenzeffektpigmente möglichst effektiv (z.B. hoher Color-Shift bzw. Glanz), kostengünstig und in hoher Druckqualität (homogener Ausdruck) verdruckt werden? Möglich sind dabei die Szenarien:

- Gleichbleibende Qualität bei Verwendung geringerer Pigmentmengen und
- Steigerung der Qualität bei unveränderter Menge an Interferenzeffektpigmenten.

Mit Qualität ist hierbei ein hoher Color-Shift und Glanz bei gleichzeitig guter Homogenität der gedruckten Schicht gemeint (vgl. Kapitel 3.1).

### 5.2.2 Zielgrößen

Im nächsten Schritt gilt es, durch die Quantifizierung der Fragestellungen die Zielgrößen oder Qualitätsmerkmale für den Druckprozess festzulegen. Diese sollten messbar sein und kontinuierliche Größen darstellen. Die Qualitätsmerkmale Color-Shift, Glanz und Homogenität werden als Zielgrößen aus Kapitel 3.1 übernommen. Die Eignung der vorhandenen Messtechnik zur Erfassung dieser Zielgrößen wurde in Kapitel 3.2 gezeigt. Die Homogenität, für die in Kapitel 3.2.3 keine messtechnische Beschreibungsmethode gefunden werden konnte, wird durch eine visuelle Abmusterung dreistufig bewertet. Dies ist in der Druckbranche üblich, da der visuelle Eindruck häufig der entscheidende ist. Die Homogenität stellt daher eine diskrete Größe dar. Durch die Bewertung der Homogenität der Proben durch zwei erfahrene Drucktechniker werden dennoch mit geringem Zeitaufwand relevante Werte zur Aufdeckung der signifikanten Einflussgrößen geliefert.

Bisher konnten die in Kapitel 4 durchgeführten Voruntersuchungen die Ursachen der Inhomogenitäten nicht erklären. Die Verwendung eines harten Unterbaus für die Druckform, wie es üblicherweise für das Drucken feiner Strukturen im Flexodruck üblich ist, und alternativer Druckformmaterialien werden nach



einigen Vorversuchen als potenzielle Möglichkeiten eingeschätzt, die Homogenität zu verbessern. Die Abhängigkeiten der Homogenität von anderen Faktoren gilt es bei diesen Untersuchungen herauszufinden. Eine weitere, besonders für den Kunden wichtige Zielgröße sind die Kosten, die je nach Wahl der Materialien für die Druckproben abgeschätzt werden können. Da sie sich aus den Materialkosten für jede einzelne Druckprobe berechnen lassen, sind die kostenbeeinflussenden Faktoren bereits bekannt. Die Kosten werden deshalb erst nach der Untersuchung der Einflüsse auf die restlichen Zielgrößen in eine Gesamtbewertung einbezogen.

Der Effekt des Glitzerns (partieller Glanz), der besonders bei größeren Pigmenten zu beobachten ist, wird in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Die mithilfe der statistischen Versuchsplanung zu charakterisierenden Qualitätsmerkmale sind somit:

1. der Color-Shift (durch den gemessenen Farbabstand  $\Delta E_H^*$ , vgl. Kapitel 3.1.1),
2. der Glanz (durch die gemessenen absoluten Glanz-Zahlen  $G$ , vgl. Kapitel 3.1.2) und
3. die Homogenität (durch eine visuelle Abmusterung, vgl. Kapitel 3.2.3).

### 5.2.3 Systemanalyse - Die modulare Rollendruckmaschine Gallus RCS330-HD als Versuchsplattform

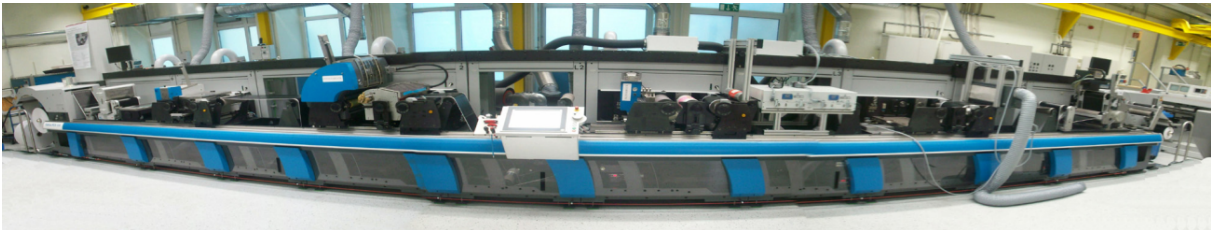
In einem weiteren Schritt ist eine Systemanalyse durchzuführen. Nach der Festlegung der Zielgrößen betrifft dies die Benennung ihrer potenziellen Einfluss- und Störgrößen. Dies kann beispielsweise in einem aus mehreren Experten bestehenden Team durch ein Brainstorming oder andere zur Ideenfindung geeigneten Kreativmethoden (vgl.[116]) geschehen [117]. Durch die in Kapitel 4 durchgeführten Versuche existiert bereits Erfahrung bezüglich verschiedener Parameter, was eine Auswahl der Einflussgrößen erleichtert. Zunächst wird dazu die Druckmaschine, auf der die Versuchsreihe durchgeführt wird, vorgestellt. Dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren steht für produktionsnahe Druckversuche die modulare Rollendruckmaschine Gallus RCS330-HD zur Verfügung (siehe Abbildungen 5.3 und A.2). Sie wird in der industriellen Produktion hauptsächlich im Etikettendruck eingesetzt und ist durch ihre spezielle Konfiguration aufgrund folgender Besonderheiten weltweit einmalig:

- Alle vorhandenen Druckverfahren (Flexo-, Tief-, Sieb-, Offsetdruck und Inkjet) sind gleichzeitig einsetzbar und in ihrer Reihenfolge leicht modular vertauschbar.
- Dadurch ergeben sich - ohne den Einsatz von wasserlosen und konventionellen Offsetdruck zu unterscheiden - 325 verschiedene Maschinenkonfigurationen.
- Einen weiteren Freiheitsgrad stellt der mögliche Einsatz verschiedenster Druckfarben bzw. Materialien dar.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MIT HILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

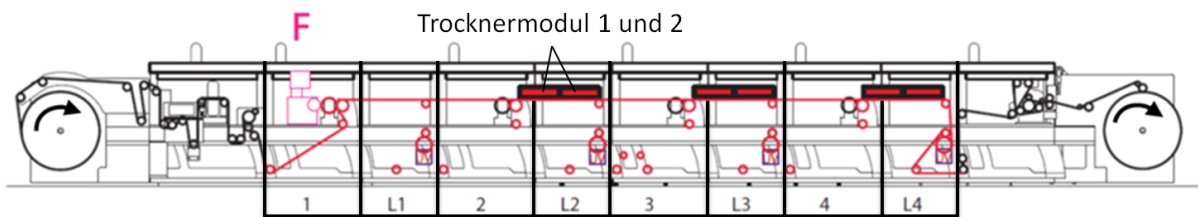
---

- Eine “Leereinheit” nach allen Druckwerken bietet neben einer serienmäßigen UV-Härtung die Möglichkeit einer vorherigen Heißluft-/IR-Trocknung ohne Bahnlaufänderung.



**Abbildung 5.3:** Modulare Rollendruckmaschine *Gallus RCS330-HD* als Versuchsplattform

Von besonderem Interesse für diese Arbeit ist das Flexodruckwerk, das zum Verdrucken der Interferenzeffektpigmentfarben verwendet wird und die variable Positionierung der Heißluft-/IR Trocknermodule in den Leereinheiten (siehe Abbildung 5.4).

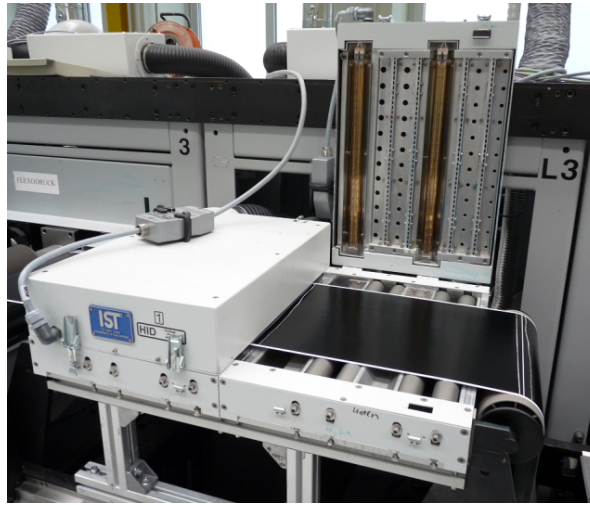


**Abbildung 5.4:** Maschinenkonfiguration zum Verdrucken von Effektpigmentfarben im Flexodruck. Die möglichen Positionen für ein Druckwerk sind mit 1 bis 4 gekennzeichnet. F steht für das Flexodruckwerk. Es befindet sich in der Position 1. L1 bis L4 stellen die Leereinheiten zwischen den Druckwerkpositionen dar. Sie werden hier als Trockenstrecke verwendet. Die Trocknermodule 1 und 2 befinden sich beide in der Leereinheit L2, L3 oder L4 über der Bedruckstoffbahn.

Abbildung 5.5 zeigt die Trocknermodule, die über der Papierbahn der *Gallus RCS330-HD* in der Leereinheit L3 montiert sind. Beide Module sind baugleich. Das rechte Trocknermodul ist geöffnet. Es sind zwei IR-Strahler und die Düsen für die Heißluftzufuhr und -abfuhr erkennbar.

Die technischen Daten der Trocknermodule und das Spektrum der IR-Strahler befinden sich im Anhang A (Abbildungen A.6, A.7 und A.8). Die unterschiedlichen Positionen und Konfigurationen (Heißluft- und IR-Trocknung) der Trocknermodule werden als verfahrenstechnische Möglichkeit gesehen, die Zielgrößen positiv zu beeinflussen. Deshalb wird eine große Anzahl an Einflussgrößen, die die Trocknung betreffen, in die Versuchsplanung integriert.

Um unterschiedliche Schöpfvolumina der Rasterwalze und damit indirekt verschiedene Lackschichtdicken zu erzeugen, wird eine Bänderwalze mit drei Bändern verwendet (siehe Abbildung A.1 im Anhang A). Diese erfüllt für alle eingesetzten Pigmentarten mindestens für jeweils ein Band die in [83] aufgeführten

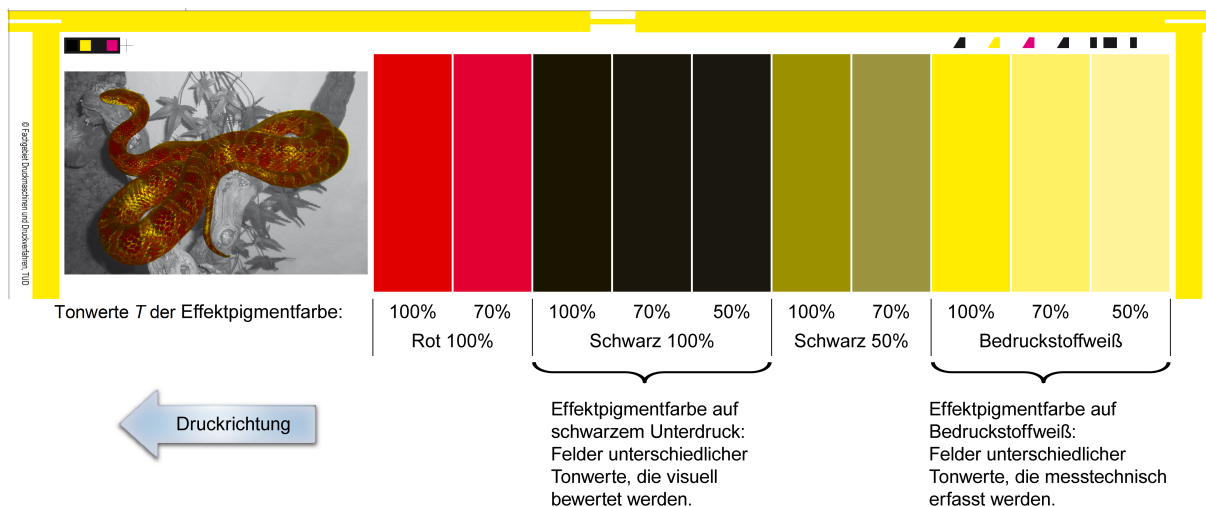


**Abbildung 5.5:** Trocknermodule mit Heißluft- und IR-Trocknung von *IST METZ*. Die beiden baugleichen Module (Länge eines Moduls 38 cm, Abstand der Düsen zur Bedruckstoffbahn ca. 1 cm) sind hintereinander in der dritten Leereinheit (L3) der *Gallus RCS330-HD* montiert. Am geöffneten Trocknermodul 2 sind die beiden IR-Strahler und die Düsen für die Heißluftzufuhr (länglichlich) und -abfuhr (rund) erkennbar.

Empfehlungen. Zusätzlich werden Halbtonflächen in das Layout der Druckform integriert, um die bisherigen Erfahrungen aus Kapitel 4.3 zu verifizieren (siehe Abbildung 5.6).

Abbildung 5.6 zeigt einen Ausschnitt des Layouts aller verwendeter Druckformen über ein Band der Rasterwalze. Das komplette Layout befindet sich im Anhang A (Abbildung A.5). Das Offsetdruckwerk der Maschine wird zur Herstellung der untergedruckten Schichten (schwarz und rot) verwendet. Da sich die Qualität der gedruckten Schicht abhängig vom Druckverfahren mit der Druckgeschwindigkeit ändert, wurden diese Schichten unabhängig vom Aufdruck der Effektpigmentfarbe bei einer Maschinengeschwindigkeit von  $160 \frac{m}{min}$  vorgedruckt. Dadurch wird der Einfluss einer möglicherweise unterschiedlichen vorgedruckten Schicht auf die Zielgrößen eliminiert. Die Druckformen (2 Offsetplatten und 1 Flexodruckform) sind für alle Bänder der Rasterwalze gleich aufgebaut. Um den visuellen Veredelungseffekt anwendungsnah darzustellen werden in der Druckbranche aussagekräftige Bilder verwendet. Links wurde deshalb eine Schlange zweifarbig (rot und schwarz) im Offset auf ein einfarbiges Hintergrundbild (Graustufen) gedruckt. Die Schlange (Kornnatter) wird anschließend vollflächig mit der Effektpigmentfarbe überdruckt. So sind die von den Druck- und Materialparametern abhängigen optischen Effekte der Pigmente im Bild nachvollziehbar. Die nachfolgenden 10 rechteckigen Felder ( $30 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ) werden ebenfalls mit der Effektpigmentfarbe in den angegebenen nominellen Tonwerten  $T$  (50%, 70% und 100%) überdruckt. Die Effektfarbe wird auf rote, schwarze, graue (50% Schwarz) Felder und direkt auf den Bedruckstoff gedruckt. Durch die verschiedenen Untergrundfarben ändert sich wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben ebenfalls die optische Wirkung der Effektpigmente. Die überdruckten schwarzen Felder werden zur visuellen Bewertung der Homogenität der Effektpigmentschichten verwendet, da diese damit am besten sichtbar

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG



**Abbildung 5.6:** Ausschnitt des Layouts aller verwendeter Druckformen über ein Band der Rasterwalze (Band 1). Gelb ist der bildgebende Bereich der Flexodruckform dargestellt, der zum Verdrucken der Effektpigmentfarben verwendet wird. Eine Effektpigmentschicht wird mit den angegebenen Tonwerten  $T$  (50%, 70% und 100%) über alle eingezeichneten Felder und vollflächig über die "Schlange" gedruckt. Rot und schwarz sind die im Offset untergedruckten Schichten eingezeichnet. Das vollständige Layout ist in Abbildung A.5 im Anhang A gezeigt. Die theoretischen Schöpfvolumina  $v_{th}$  der Bänderwalze betragen 13, 19 und  $25 \frac{cm^3}{m^2}$ .

ist. Die messtechnische Bewertung des Color-Shift und Glanz erfolgt, wie empfohlen, bei den direkt auf den Bedruckstoff gedruckten Effektpigmentschichten. So können außerdem jegliche Druckfehler der untergedruckten Schicht ausgeschlossen werden. Dieser Kompromiss, real unterschiedliche Probenfelder zu bewerten und diese bei der Auswertung als dieselben zu betrachten, ist berechtigt, da keine signifikanten Unterschiede der Homogenität der Effektpigmentschichten bei einer schwarzen und fehlenden untergedruckten Schicht beobachtet werden konnten.

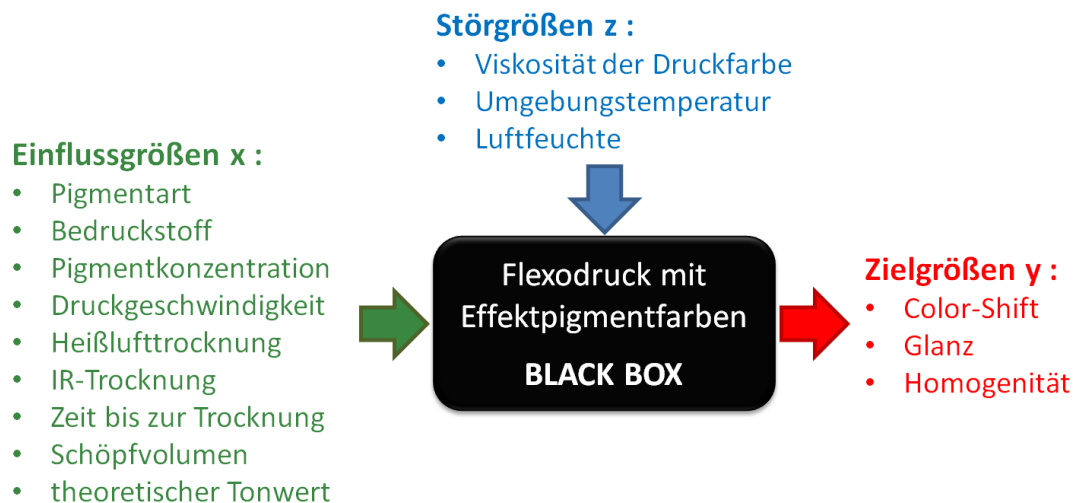
Die Druckgeschwindigkeit ist mit der Druckmaschine sehr einfach einzustellen und wird ebenfalls verändert. Des Weiteren werden die in Kapitel 4.1 ermittelten Haupteinflussgrößen, Bedruckstoff, Pigmentart und Pigmentkonzentration variiert. Andere maschinenspezifische Einstellungen, wie beispielsweise die Druckbeistellung zwischen Form- und Druckzylinder, werden nach der Einstellung durch den Drucker in der Maschine gespeichert und für nachfolgende Versuche übernommen.

Als Störgrößen können die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Viskosität der Effektpigmentfarbe betrachtet werden. Letztere ist zudem abhängig von der Pigmentkonzentration. Bei höherer Pigmentierung steigt durch den größeren Feststoffanteil die Viskosität der Suspension. Um eine möglichst homogene Viskosität der "Druckfarbe" zu erreichen, wird sie vor jedem Druckversuch gründlich gemischt und anschließend mit einer Schlauchpumpe ständig in Bewegung gehalten, was die Sedimentation und Agglomeration der Pigmente unterbindet. Gleichmäßig im Lack verteilte und nicht agglomerierte Pigmente gelten als Grundvoraussetzung für gute Effekte [1]. Die Rasterwalze wird zudem 30 Minuten

lang vor jedem Druckversuch mit der Effektpigmentfarbe eingefärbt, um einen stationären Zustand vor Druckbeginn zu erreichen.

#### 5.2.4 Qualitatives Prozessmodell

Das Ergebnis der Systemanalyse ist das qualitative Prozessmodell, das alle Einfluss-, Ziel- und Störgrößen beinhaltet. Es ist für diese Untersuchung in Abbildung 5.7 dargestellt. Der Prozess des Druckens von Effektpigmentfarben wird als Black Box betrachtet, da die Zusammenhänge zwischen Ziel- und Einflussgrößen bisher nicht bekannt sind. Diese sind durch die Versuche aufzudecken.



**Abbildung 5.7:** Schematische Darstellung des qualitativen Prozessmodells. Der Druckvorgang wird als “Black Box” betrachtet. Einfluss-, Stör- und Zielgrößen sind aufgelistet.

Die Trocknerposition wird nicht als Einstellgröße gesehen, da sie das Produkt aus “Druckgeschwindigkeit” und “Zeit bis Trocknung” darstellt. Mit Letzterem ist die Zeit gemeint, in der eine gedruckte Schicht vom Druckspalt bis zum Beginn des ersten Trocknermoduls gelangt. Diese Zeit steht den Pigmenten innerhalb des Lacks zur Verfügung, um vor der Trocknung ihre Lage zu ändern. Durch diesen Faktor wird ein größerer Einfluss auf die Zielgrößen vermutet als durch die Berücksichtigung der Trocknerposition. Um lineare Abhängigkeiten einzelner Einflussfaktoren zu vermeiden, wird die Trocknerposition bei der Versuchsauswertung nicht weiter berücksichtigt.

Störgrößen sind im Sinne der statistischen Versuchsplanung generell konstant zu halten oder zu messen, um so die Zufallsstreuung zu minimieren [112]. Sie stellen die Eingangsgrößen dar, die nicht gezielt verändert werden können. Da sich die Druckmaschine in einer nicht klimatisierten Versuchshalle befindet, wird die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Weil die genaue Viskosität der Druckfarbe nur mit hohem Aufwand genau zu bestimmen ist und eine gemessene Viskosität kaum die Viskosität im Druckspalt darstellt, wird sie vor Beginn des Druckprozesses lediglich mit einem 4mm-Auslaufbecher

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---













nach DIN 53211 gemessen. Dabei konnten wie erwartet höhere Viskositäten bei größeren Pigmenten und höherer Pigmentkonzentration festgestellt werden. Die gemessenen Werte liegen zwischen 24 und 117 s. Die Umgebungstemperatur lag während der über mehrere Tage andauernden Druckversuche im Bereich von 22,9 – 27,0 °C, die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 15,3 – 46,3 %. Durch eine nicht minutengenaue Dokumentation der Druckversuchszeiten, können diese Störgrößen nicht jedem Druckversuch eindeutig zugeordnet werden und werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Die Kosten werden nicht als Zielgröße betrachtet, da deren Berechnung bekannt ist. Auf sie wird in Kapitel 5.4.5 eingegangen.

### 5.2.5 Hypothesen für den Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen

Um eventuell auftretende Wechselwirkungen von Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Zielgrößen zu erkennen, kann eine sogenannte Wechselwirkungsmatrix erstellt werden. Eine Wechselwirkung zweier Faktoren bezüglich einer Zielgröße tritt auf, falls der Effekt des einen Faktors von dem Wert des anderen abhängt [112]. Aus den sich ergebenden vermuteten oder den bisherigen Erfahrungen entsprechenden Kurvenverläufen können im Anschluss die Terme für das hypothetische Regressionsmodell abgeleitet werden. Je nachdem welche Abhängigkeiten durch die Kurvenverläufe (linear, quadratisch,...) erwartet werden, desto mehr Terme und damit Versuche werden zur Erstellung eines geeigneten Regressionsmodells benötigt, das in der Lage ist, diese Beziehungen zu beschreiben und zu überprüfen. In den Vorversuchen konnten lediglich geringe oder keine Wechselwirkungen der Einflussgrößen bezüglich Color-Shift und Glanz beobachtet werden. In Zusammenarbeit mit beteiligten Experten wurden die erwarteten Einflüsse einiger Einflussfaktoren auf die Zielgrößen in hypothetischer Form aufgestellt (siehe Abbildung 5.8).

Die Darstellung der Zusammenhänge der Einfluss- und Zielgrößen konnte hierbei nicht eindeutig auf physikalische Effekte zurückgeführt werden. Sie sind somit als Vermutungen zu betrachten. Als Beispiel sei hier die Heißluft- und IR-Trocknung betrachtet. Der Glanz und der Color-Shift nimmt zunächst mit steigender Trocknerleistung nichtlinear zu, erreicht ein Maximum und fällt bei höheren Luftstrommengen und Temperaturen wieder nichtlinear ab [110]. Es wird vermutet, dass sich bei einer bestimmten Luftströmung eine flache gedruckten Schicht (beschleunigtes “Levelling” [118]) ausbildet. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit an, so werden aufgrund der in Reihen angeordneten Düsen in den Trocknermodulen lateral stark unterschiedliche Druckfarbendicken begünstigt und die Pigmente in Richtung der dickeren Schichten verschoben, was den Color-Shift und Glanz wieder verringert. Dasselbe gilt für die IR-Trocknung. Bei Temperaturen über 90 °C verändern sich die Lackeigenschaften und mindern die optische Wirkung der Effektpigmentschicht. Ähnliches wird für sinkende Druckgeschwindigkeiten bei konstanten Trocknerleistungen vermutet. Weiterhin wird angenommen, dass ab einer gewissen Farbschichtdicke keine Vergrößerungen des Color-Shift und Glanz mehr zu erwarten sind.

Um die unterschiedlichen Zusammenhänge in einem Regressionsmodell überprüfen zu können, werden die

Zusammenhänge	Zielgrößen	
Einflussgrößen	Glanz	Color-Shift
Pigmentkonzentration		
Farbschichtdicke		
Zeit bis zur Trocknung		
Heissluft-/ IR-Trocknung		
Druckgeschwindigkeit		
Tonwert		

**Abbildung 5.8:** Potenzielle Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen. Bei steigendem Einflussfaktor  $x$  werden folgende Auswirkungen auf die Zielgröße  $y$  vermutet (rechte Spalte von oben nach unten): lineares Ansteigen von  $y$ ; lineares Ansteigen und halten des Wertes von  $y$ ; keine Änderung von  $y$ ;  $y$  steigt, erreicht ein Maximum und fällt wieder;  $y$  ändert sich nicht, steigt linear und hält dann den Wert.

Einflussgrößen mehrstufig verändert. Die Festlegung dieser Stufen ist der nächste Schritt der Versuchsplanung.

### 5.2.6 Einstellbereich der Einflussfaktoren

Die betrachteten Einflussfaktoren auf das System sind in Abbildung 5.7 aufgelistet. Unter Berücksichtigung der vermuteten Wechselwirkungen, des hauptsächlichen Interesses an einer verfahrenstechnischen Optimierungsmöglichkeit und bereits erwähnter Umstände, werden die in Abbildung 5.9 aufgezeigten Stufen zur Variation der Einflussgrößen gewählt. Die Einstellbereiche wurden nach den Erfahrungen aus den umfangreichen Vorversuchen festgelegt. Dies macht noch einmal deutlich, dass eine statistische Versuchsplanung nicht ohne Kenntnisse der druckspezifischen Bedingungen geplant und durchgeführt werden kann.

Die Druckgeschwindigkeit wird auf  $50 \frac{m}{min}$  beschränkt, da sonst aufgrund der eingeschränkten Trocknerleistung beim Drucken auf Folie ein Verblocken der Farbschichten bei der Aufwicklung auftritt. Des Weiteren müssen, um bei der OPP-Folie eine Trocknung gewährleisten zu können, alle Heißluft-Trockner eingeschaltet sein. Da sich die Folie außerdem bei Temperaturen  $> 100^\circ C$  wellt oder reißen kann, wird beim Bedrucken der Folie keine IR-Trocknung eingesetzt. Für die statistische Versuchsplanung ist es wichtig, möglichst kontinuierliche Größen - besonders bei mehrstufigen Einflussfaktoren - zu verwenden.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

Substrat	Pigmentart	Pigment-konzentration	Trockner 1 Heißluft	Trockner 2 Heißluft	Trockner 1 IR-Strahler	Trockner 2 IR-Strahler	Trockner-position	Druckge-schwindigkeit	Schöpf-volumen	Tonwert
OPP	Colorstream Arctic Fire (CS)	10 %	ein	ein	0	0	L2	20 m/min.	13 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	50 %
Maxi Satin (MS)	Miraval Scenic Copper (MSC)	20 %	aus	aus	1	1	L3	30 m/min.	19 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	70 %
	Iriodin Ultra Rot (IU)	30 %			2	2	L4	50 m/min.	25 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	100 %
	Iriodin Rutil Feinrot (IF)									

**Abbildung 5.9:** Auflistung der für die Versuchsreihe gewählten Einflussfaktoren und deren Stufen. In Klammern befinden sich die Abkürzungen für das Substrat und die Pigmentart, die im Folgenden verwendet werden.

den. Das verringert die Anzahl der zur Erfüllung eines Regressionsmodells benötigten Einzelversuche und verbessert deren Aussagekraft. Daher werden bei der Versuchsplanung anstatt der Positionen der Trocknermodule (L2, L3, L4) deren Entfernungen zum Druckspalt angegeben und die Schöpfvolumina der Rasterwalze und die Tonwerte ebenfalls in Zahlenwerten beschrieben.

Anstatt der Entfernungen der Trockner wird die Größe “Zeit bis zur Trocknung” als Einflussgröße weiterhin betrachtet, da von dieser ein höheres Einflusspotenzial auf die Zielgrößen erwartet wird. Eine Berücksichtigung beider Einflussfaktoren ergäbe eine Kollinearität, die die Analysierbarkeit der Messdaten erheblich beeinträchtigen kann [105], weil dadurch die Änderung einer Zielgröße nicht eindeutig einer Einflussgröße zugeordnet werden kann [111]. Deshalb wird neben der Druckgeschwindigkeit nur die “Zeit bis zur Trocknung” als Einflussgröße betrachtet.

Treten bei der Kombination von Versuchseinstellungen beispielsweise aus technischen Gründen Einschränkungen auf, so können diese von *Cornerstone<sup>TM</sup>* berücksichtigt werden. Bei dieser Versuchsreihe betrifft das unter anderem den Einsatz der IR-Trocknung. Diese ist nur möglich, wenn gleichzeitig eine Heißluft-trocknung stattfindet.

### 5.2.7 Hypothetisches Regressionsmodell

Ein Regressionsmodell beschreibt ganz allgemein die Zielgröße als Funktion der Einflussgrößen (Gleichung 5.1) und damit die Rückführung von Messergebnissen auf einen mathematischen Zusammenhang der Einflussgrößen  $x_j$  (vgl. [111]).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + e \quad (5.1)$$

Aus der Anzahl ( $m$ ) und Art der zu berücksichtigenden Einflussgrößen, Wechselwirkungen und potenziellen Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen  $x_j$  und der Zielgröße  $y$ , lassen sich die Terme für ein hypothetisches Regressionsmodell ableiten.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + \dots + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots + e \quad (5.2)$$



Läge ein lineares Regressionsmodell ohne diskrete Einflussgrößen und ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen vor, würde Gleichung 5.2 direkt durch Ausmultiplizieren der Gleichung 5.3 entstehen. In diesem Fall würden die quadratischen und multiplikativen Faktoren von  $x_j$  in Gleichung 5.2 entfallen.  $y$  stellt in beiden Gleichungen einen gemessenen Wert einer Zielgröße dar, wodurch sich für jeden Einzelversuch eine Gleichung der Form 5.2 bzw. 5.3 aufstellen lässt.

$$y = \vec{b} \cdot \vec{x} + e = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} + e \quad (5.3)$$

Die Koeffizienten  $b_j$  sind aus den Versuchsergebnissen über die Regression zu bestimmen. Je nachdem, ob Wechselwirkungen, quadratische Effekte und andere Abhängigkeiten der Einflussgrößen gegenüber der Zielgröße vermutet werden, tauchen in Gleichung 5.2 multiplikative Beziehungen und verschiedene Potenzen der Einflussgrößen  $x_j$  auf. Die Eins führt zu der Konstante  $b_0$  im Modell. Die Anzahl der Terme im Modell ist dabei  $p$ , was im Falle von 5.3 der Anzahl der Einflussgrößen plus der Konstante ( $m + 1$ ) entspricht. Der Summand  $e$  in den Gleichungen 5.1, 5.2 und 5.3 entspricht dem statistischen Fehler des Modells. Diese Abweichung zwischen dem gemessenen und dem durch das Modell berechneten Wert der Zielgröße wird als Residuum bezeichnet. Sie setzt sich unter anderem aus Messunsicherheiten und den Störgrößen (vgl. Abbildung 5.7) zusammen. Jedes Regressionsmodell lässt sich für alle Werte einer Zielgröße auch in einer allgemeingültigen Matrizenschreibweise darstellen:

$$\vec{y} = \mathbf{X} \cdot \vec{b} + \vec{e} \quad (5.4)$$

Sind, wie im Fall der hier zu planenden Druckversuche, mehrere Zielgrößen von Interesse, so wird für jede Zielgröße ein Regressionsmodell entsprechend Gleichung 5.4 aus den Einflussgrößen gebildet. Die Koeffizientenmatrix der Einflussgrößen  $\mathbf{X}$  ergibt sich aus den zu berücksichtigenden Effekten. Sie können linear, quadratisch oder von höherer Ordnung sein (vgl. [111]). Die Anzahl der benötigten Versuche ist von der Anzahl und Art (kontinuierlich oder diskret) der Einflussgrößen, ihrer Stufen, der zu berücksichtigenden Wechselwirkungen und der Anzahl der Terme höherer Ordnung abhängig. Rein mathematisch werden, um ein Gleichungssystem zu lösen, immer mindestens so viele Gleichungen wie Unbekannte benötigt. Um den statistischen Fehler  $e$  schätzen zu können, wird mindestens ein weiterer Versuch benötigt. *Cornerstone*<sup>TM</sup> empfiehlt, fünf zusätzliche Versuche durchzuführen, um eine hinreichend genaue Schätzung zu erhalten. Aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren wird ein lineares Regressionsmodell gewählt und Wechselwirkungen und quadratische Terme nicht einbezogen. Wechselwirkungen vieler Einflussgrößen sind laut Kapitel 4.1 ohnehin kaum zu erwarten. Die Versuchsplanung erfolgt mit *Cornerstone*<sup>TM</sup> durch die Implementierung der Einflussfaktoren, ihrer Art (kontinuierlich oder diskret) und ihrer Stufen. In diesem Fall setzt sich die von *Cornerstone*<sup>TM</sup> empfohlene Versuchsanzahl

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

folgendermaßen zusammen:

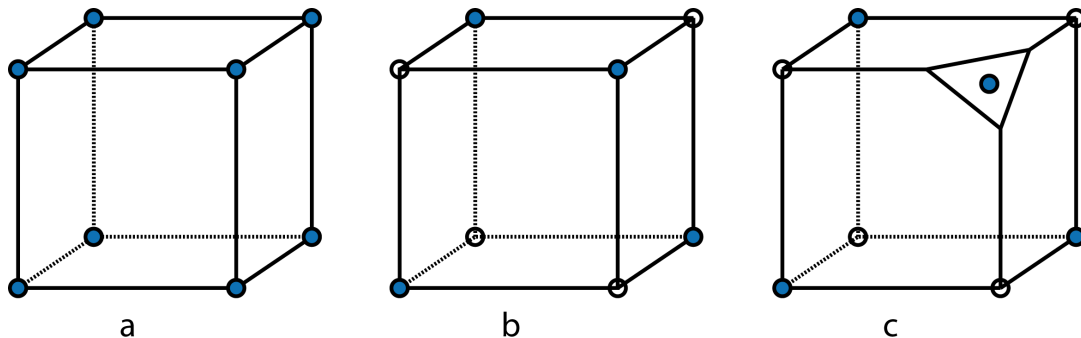
**Tabelle 5.1:** Anzahl der für eine lineare Regression nötigen Versuche

Terme im Modell	notwendige Versuchsanzahl	
	Planungssicht	Auswertungssicht
Konstante	1	1
lineare Terme	9	11
aus diskreten Größen (>2 Stufen)	7	2
statistischer Fehler $e$	5	5
empfohlene Versuchsanzahl (Summe)	22	19
minimale Versuchsanzahl (Summe ohne $e$ )	17	14

Die für ein lineares Regressionsmodell ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Effekten höherer Ordnungen notwendigen Versuchszahlen sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Es wird hierbei zwischen der Planungs- und der Auswertungssicht unterschieden, was eine unterschiedliche Zahl an mindestens durchzuführender Versuche ergibt. Derjenige, der die Versuche durchführen wird, interessiert sich für die konkreten Maschineneinstellungen, die er für jeden Versuch variieren muss. Derjenige, der die Versuche auswertet, hat Interesse an den zur Analyse herangezogenen gemessenen Parametern. In der Realität müssen deshalb beide Sichtweisen betrachtet werden. Hier wird die Position der Trockner nicht bei der Auswertung berücksichtigt, außerdem gehen die unterschiedlichen Tonwerte und die Schöpfvolumina nicht in die Versuchsdurchführung ein, da durch die Bänderwalze und das Layout der Druckform immer alle Variationen abgedruckt werden. Dadurch unterscheiden sich die Anzahl der linearen Terme beider Betrachtungsweisen. Bei diskreten Einflussfaktoren mit mehr als zwei Stufen wird für jede weitere Stufe ein zusätzlicher Versuch notwendig. Um in *Cornerstone<sup>TM</sup>* die exakten für die Versuchsdurchführung gewünschten Stufen implementieren zu können, und damit einen real umsetzbaren Versuchsplan zu erhalten, müssen einige Einflussfaktoren, die bei der Auswertung kontinuierliche Größen darstellen, bei der Planung zunächst als mehrstufig diskrete Größen betrachtet werden. Dies ist ein Nachteil, da sich die Versuchsanzahl durch die mehrstufigen diskreten Einflussgrößen in der Planungssicht erhöht. Werden die gemessenen Daten nach der Durchführung der Versuche in *Cornerstone<sup>TM</sup>* implementiert, so werden die betroffenen Einflussgrößen als kontinuierliche Größen erkannt. Dies hätte eine Reduzierung des ursprünglich geplanten Versuchsumfangs erlaubt (siehe Tabelle 5.1). Die minimale Anzahl von 17 Versuchen multipliziert sich durch die Variation der Geschwindigkeit (siehe Abbildung 5.9) um den Faktor drei. Die Druckgeschwindigkeit wird für jede Einstellung in allen Stufen geändert, da sie im Versuchsablauf sehr einfach an der Rollendruckmaschine regulierbar ist und dadurch kaum ein zusätzlicher Aufwand erzeugt wird.

### 5.2.8 Wahl des geeigneten Versuchsplantyps

Ziel der statistischen Versuchsplanung ist es, wie schon in Kapitel 5.1 beschrieben, die Anzahl der Versuche gegenüber einem konventionellen Versuchsplan deutlich zu reduzieren, ohne dabei die Größe des Versuchsraums entscheidend zu schmälern und trotzdem die gewünschten Informationen zu erhalten. Durch die Auswahl der Versuche soll weiterhin der statistische Fehler minimiert werden und das Prinzip der Balanciertheit erfüllt sein. Dieses fordert, dass alle Stufen der Einflussfaktoren in gleicher Häufigkeit im Versuchsplan enthalten sind. Dazu ist als letzter Schritt der Versuchsplanung ein geeigneter Versuchsplan zu wählen. In Abbildung 5.10 sind die drei am häufigsten verwendeten Versuchspläne für jeweils drei Faktoren und zwei Stufen skizziert. Jede Achse im skizzierten dreidimensionalen Raum steht für eine Einflussgröße, jeder Punkt für eine konkrete Versuchseinstellung.



**Abbildung 5.10:** Skizzen unterschiedlicher Versuchsplantypen bei 3 Einflussfaktoren mit je 2 Stufen. Die dargestellten Punkte stellen eine konkrete Versuchseinstellung dar, die Achsen die Einflussgrößen. a: vollfaktoriell, b: teilfaktoriell, c: D-optimal (in Anlehnung an [105])

#### Vollfaktorieller Versuchsplan

Ein vollfaktorieller Versuchsplan oder konventioneller Versuchsplan (siehe Abbildung 5.10a) ist sehr zeit- und kostenintensiv, deckt aber den Versuchsraum komplett ab. Das heißt, dass ohne Ausnahmen alle möglichen Kombinationen der unterschiedlichen Stufen aller Einflussgrößen durch einen Versuch dargestellt sind. Diesen Versuchsplan gilt es, durch den Einsatz der statistischen Versuchsplanung, zu vermeiden. Die Anzahl der Versuche  $n$  steigt bei dieser Versuchsplanart potenziell an. Besitzen alle Einflussfaktoren dieselbe Anzahl an Stufen  $s$ , so werden dafür

$$n = s^m \quad (5.5)$$

Versuche benötigt. Bei drei Faktoren und je zwei Stufen ergeben sich damit nach Gleichung 5.5 acht Versuche, die durch die acht Punkte in Abbildung 5.10a repräsentiert werden. Für die hier zu planenden Versuche wäre demnach - ohne die Schöpfvolumina und die Tonwerte zu berücksichtigen - eine Anzahl von mehr als 7.700 Versuchen notwendig, um den gesamten Versuchsraum abzudecken.

### Teilfaktorieller Versuchsplan

Bei einem teilfaktoriellen Versuchsplan (siehe Abbildung 5.10b) werden nicht alle Ecken des Versuchsraums berücksichtigt. Er erfüllt jedoch weiterhin das Prinzip der Balanciertheit. Diese kann durch eine Projektion des Versuchsraums auf eine Ebene überprüft werden. Wird in jeder Projektionsebene dadurch ein vollfaktorieller Versuchsplan aus zwei Einflussfaktoren erzeugt (siehe Abbildung 5.10b), so ist die Balanciertheit gegeben [111]. Nachteilig ist, dass die Anzahl der Versuche immer einer Potenz von zwei entsprechen muss, da die Anzahl der Stufen der Einflussfaktoren bei diesem Versuchsplantyp auf zwei beschränkt ist ( $s = 2$ ):

$$n = 2^{(m-q)} \quad (5.6)$$

Bei geringer Versuchsanzahl beziehungsweise Auflösung kann eine Vermischung von Haupteffekten und Wechselwirkungen auftreten (siehe [112]).

### D-optimaler Versuchsplan

Abbildung 5.10c zeigt einen D-optimalen Versuchsplan. Dieser ist aufgrund seines geringeren Rechenaufwands unter den optimalen Versuchsplänen am weitesten verbreitet. Die Optimierung des Regressionsmodells erfolgt hierbei durch eine Minimierung des Volumens des gemeinsamen Vertrauensbereichs für die Regressionskoeffizienten [112]. Das bedeutet, dass bei einem D-optimalen Versuchsplan aus der Grundgesamtheit diejenigen Versuchskombinationen ausgewählt werden, die unter den gegebenen Bedingungen den Versuchsraum maximieren und zudem eine möglichst große Balanciertheit gewährleisten [111]. Dadurch wird eine Verringerung der Streuung der Koeffizienten erreicht. Optimale Versuchspläne bieten dem Experimentator die meisten Freiheiten bei der Festlegung des Versuchsplans. Durch minimalen Aufwand können die relevanten Effekte überprüft werden. Im Vergleich zu vielen anderen Versuchsplantypen erlaubt dieser

- die Berücksichtigung prozessabhängiger Einschränkungen des Versuchsraums,
- die Verwendung mehrerer diskreter Einflussgrößen mit mehr als drei Stufen,
- das nachträgliche Einbetten weiterer Versuche in einen bereits durchgeführten Versuchsplan,
- eine Einschränkung der Randomisierung und
- Abstriche bei der Balanciertheit der Versuche, die jedoch vermieden werden sollten.

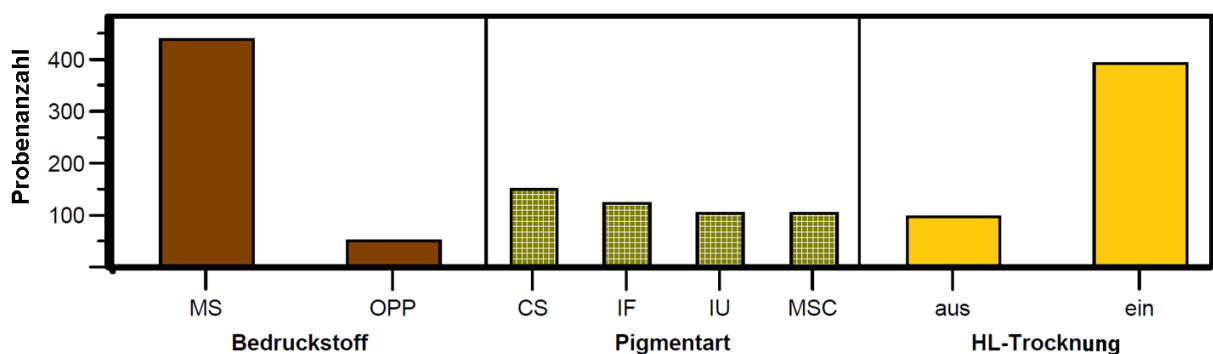
Aufgrund dieser Freiheiten ist ein optimaler Versuchsplan oft der einzig technisch umsetzbare Versuchsplantyp. Zudem fordert das Prinzip der Randomisierung eine stetige Variation der Stufen der Einstellgrößen von Versuch zu Versuch, um den Beitrag des systematischen Fehlers zu den Effekten der Einflussgrößen zu minimieren. Dadurch kann das “Signal” vom “Rauschen” unterschieden werden und letzteres

minimiert werden [100].

Für diesen Versuch werden die beiden Trocknermodule in drei verschiedene Leereinheiten (siehe Abbildung 5.4) - jedoch immer zusammen - positioniert. Da dieser Umbau sehr zeitaufwändig ist, wird er nur zweimal durchgeführt. Diese Bedingung schränkt die Randomisierung für den Versuchsplan ein. Sie wird ebenfalls nicht erfüllt, da die chronologische Abfolge aller Einzelversuche an den zeitlichen Aufwand zur Änderung aller Einflussgrößen angepasst wird. Um das Nutzen-Aufwand-Verhältnis nicht in Richtung höheren Aufwand durch die Variation der Einflussgrößen zu verschieben, wird eine Priorisierung nach der “Einfachheit der Faktorvariation” durchgeführt und umgesetzt. Diese wird in *Cornerstone<sup>TM</sup>* zusammen mit den prozessbedingten Einschränkungen implementiert. Letztere sind hierbei:

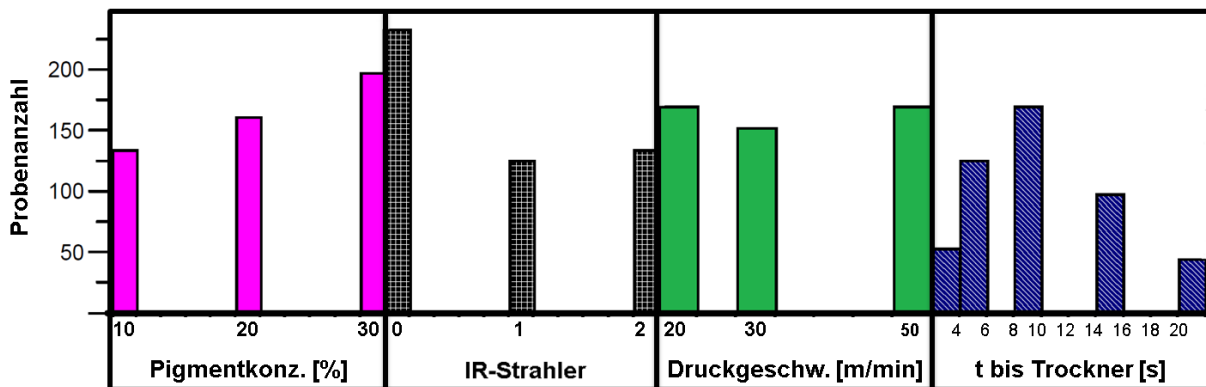
- Einschaltung beider Heißlufttrockner, falls OPP-Folie verwendet wird, da sonst keine vollständige Trocknung möglich ist;
- Ausschaltung der IR-Trocknung, falls OPP-Folie verwendet wird, da sonst aufgrund der hohen Temperaturen eine Wellung der Folie auftritt;
- Einschaltung des Heißlufttrockners, falls in demselben Trocknermodul auch die IR-Trocknung eingeschaltet ist, da aus technischen Gründen sonst kein Betrieb der IR-Strahler möglich ist.

Diese prozessbedingten Einschränkungen wirken sich auf die Balanciertheit der Versuche negativ aus. Die Abbildungen 5.11 und 5.12 zeigen die Häufigkeiten der Stufen der diskreten und kontinuierlichen Einflussgrößen. Da bei keinen der dargestellten Einflussgrößen alle Stufen gleich häufig auftreten, liegt bei all diesen Einflussgrößen keine vollständige Balanciertheit vor. Diese ist jedoch bei den Einflussgrößen Schöpfvolumen und Tonwert vorhanden, da diese unabhängig von den Materialien und der Maschinenkonfiguration nur innerhalb der Druckform variieren.



**Abbildung 5.11:** Häufigkeiten der Stufen der diskreten Einflussgrößen. Aufgetragen sind die Häufigkeiten der Stufen der Einflussgrößen Bedruckstoff, Pigmentart und Heißlufttrocknung. Die Summe aller Häufigkeiten einer Einflussgröße ergibt die Gesamtzahl der Druckproben ( $n = 495$ ). Die Abkürzungen sind Abbildung 5.9 zu entnehmen. Es ist deutlich beim Bedruckstoff und der Heißlufttrocknung zu erkennen, dass die Versuche nicht balanciert sind.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG



**Abbildung 5.12:** Häufigkeit der Stufen der kontinuierlichen Einflussgrößen. Aufgetragen sind die Häufigkeiten der Stufen der Einflussgrößen Pigmentkonzentration, IR-Strahler, Druckgeschwindigkeit und Zeit bis zur Trocknung. Eine vollständige Balanciertheit aller Stufen einer Einflussgröße liegt auch hier nicht vor. Die Summe der Häufigkeiten aller Stufen einer Einflussgröße ergibt wieder die Gesamtzahl der Druckproben ( $n = 495$ ). Da bei der IR-Trocknung die Strahler eines Trocknermoduls einzeln schaltbar sind, werden als Stufen die eingeschalteten IR-Strahler verwendet.

Die Versuche mit OPP-Folie und ausgeschalteter Heißlufttrocknung sind in Unterzahl, während die mit ausgeschalteten IR-Strahlern überwiegen. Da die Häufigkeiten der einzelnen Stufen beider Heißlufttrockner und der integrierten IR-Strahler gleich groß sind (alle Heißlufttrockner und gleich viele IR-Strahler sind bei der gleichen Anzahl an Versuchen ein bzw. ausgeschaltet), sind diese Einflussgrößen in den Abbildungen 5.11 und 5.12 nur je einmal dargestellt. Das Trocknermodul 1 und 2 wird demnach nicht separat aufgeführt.

Die Häufigkeit der Proben gleicher Druckgeschwindigkeit unterscheidet sich aufgrund der zusätzlichen Vermessung von jeweils zwei Nutzen bei zwei Versuchseinstellungen, die bei den Geschwindigkeiten 20 und 50  $\frac{m}{min}$  gedruckt wurden. Die Zeit bis zur Trocknung folgt einer Verteilung, da sie sich aus der Division der Entfernungen der Trockner vom Druckspalt und der Druckgeschwindigkeit ergibt. Die Verteilung der Pigmentkonzentration kann dadurch erklärt werden, dass die Pigmentkonzentration bei den angesprochenen Wiederholmessungen in beiden Fällen bei 30 % lag. Ohne deren Berücksichtigung wäre die Anzahl der Druckproben bei 30 % und 20 % Pigmentanteil gleich groß. Der Unterschied zur niedrigeren Pigmentkonzentration ist auf *Cornerstone<sup>TM</sup>* zurückzuführen. Da die ursprüngliche Versuchsanzahl von 17 nicht durch drei teilbar ist, kann keine vollständige Balanciertheit der Pigmentkonzentration erreicht werden. Daher ist die Anzahl der Druckproben bei 10 % Pigmentanteil um 27 geringer. Das ist plausibel, da sich immer neun Proben auf jedem Nutzen befinden und die Geschwindigkeit immer zusätzlich in drei Stufen variiert wird. Wie bei der Pigmentart können bei einer bestimmten Anzahl an Versuchen nicht alle Einflussgrößen vollständig balanciert sein. Das Schöpfvolumen und der Tonwert sind nicht abgebildet, da ihre Stufen auf jedem Druckbogen in derselben Häufigkeit auftreten und damit immer exakt balanciert

sind.

Durch das Einbringen dieser Einschränkungen ist für diese Versuchsreihe ein D-optimaler Versuchsplan der einzig real umsetzbare. Um die komplexe Theorie der statistischen Versuchsplanung für den Anwender zugänglich zu machen, wird bei der Planung von Versuchsläufen die Software *Cornerstone<sup>TM</sup>* verwendet. Aufgrund ihres hohen mathematischen Rechenaufwands können D-optimale Versuchspläne faktisch nur mit einer Software erstellt werden [105]. Die Zeit, die aufgrund der eingeschränkten Randomisierung und den damit verbundenen minimalen Maschinenumrüstungen gewonnen wird, wird in die Auswertung der Druckproben investiert. Das verletzte Prinzip der Randomisierung wird durch die Auswertung einer hohen Anzahl an Druckproben bei einer mäßigen Anzahl an Versuchseinstellungen kompensiert und dadurch eine statistische Glaubwürdigkeit erzeugt. Im Folgenden wird kurz auf die Versuchsdurchführung eingegangen.

### 5.3 Versuchsdurchführung

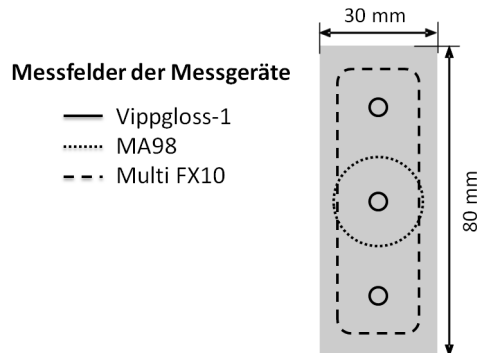
Die Druckversuche wurden von zwei erfahrenen Drucktechnikern (einem Druckermeister mit 20 Jahren Berufserfahrung und einem Druckingenieur mit fünf Jahren Berufserfahrung im Forschungsbetrieb) auf der *Gallus RCS330-HD* in einem Zeitraum von ungefähr zwei Wochen durchgeführt. Der Bedruckstoff, sowohl die Folie als auch das Papier, wurde im Offsetdruckverfahren mit einer schwarzen und angemischten roten UV-Farbe bei einer Druckgeschwindigkeit von  $160 \frac{m}{min}$  vorgedruckt. Die Vorgehensweise bei der Farbanmischung und Konditionierung war immer die gleiche. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche wird unter Berücksichtigung der Tabelle 5.1 gebildet. Dabei wird die nach der Planungssicht minimale Versuchsanzahl (17) gewählt und durch die Variation der Geschwindigkeit um den Faktor 3 erhöht. Zudem werden von zwei Versuchseinstellungen je zwei zusätzliche Nutzen vermessen, um Aussagen über die Streuung der Messergebnisse bei stark unterschiedlicher Homogenität der Druckproben zu erhalten. Insgesamt ergeben sich dadurch 51 verschiedene Versuchseinstellungen sowie 4 Wiederholversuche, die der Auswertung zur Verfügung stehen. Der vollständige Versuchsplan und das Versuchsprotokoll befinden sich im Anhang (Abbildungen A.3 und A.4). Durch die 3 Bänder der Rasterwalze und die 3 unterschiedlichen Tonwerte für jedes Band, werden insgesamt 495 Druckproben vermessen, wobei 459 sich aufgrund der Maschineneinstellungen unterscheiden. Diese Anzahl übertrifft bei weitem die in Tabelle 5.1 empfohlene Anzahl von 19 Versuchen nach der Auswertungssicht und verbessert dadurch das sich daraus ergebende Regressionsmodell.

Für die Messung von Color-Shift und Glanz werden die Proben ohne Unterdruck verwendet. Zur visuellen Begutachtung der Homogenität werden die Felder mit schwarzem Unterdruck genutzt. Für die Auswertung des Color-Shift werden in diesem Kapitel die Messergebnisse des *Multi FX10* verwendet, da die Messungen zeitnah nach den Druckversuchen erfolgte. Der  $\Delta E_H^*$ -Wert wird, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, aus

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

den aus drei Messungen gemittelten  $L^*$ -,  $a^*$ - und  $b^*$ -Werten nach Gleichung 3.1 berechnet. Abbildung 5.13 zeigt die Messfelder der eingesetzten Messgeräte zur Glanz- und Color-Shift-Messung bezogen auf die Größe einer Druckprobe (vgl. Abbildung 5.6). Bei der Glanzmessung werden alle Druckproben an 3 Stellen jeweils 3 Mal vermessen und der arithmetische Mittelwert (Glanzwert  $G$ ) festgehalten.



**Abbildung 5.13:** Messfelder bei der Glanz- und Color-Shift-Messung im Bezug zu den rechteckigen Effektpigmentproben

Um einen Einfluss des Untergrunds, auf dem die Druckproben vermessen werden, konstant zu halten, wird bei allen Proben, sowohl für die Glanzmessung als auch zur Messung des Color-Shift, das Papier *Phönix Imperial II* von *Scheufelen* ohne optische Aufheller als Unterlage verwendet.

### 5.4 Versuchsauswertung

Nach der Versuchsdurchführung und dem Vermessen der Druckproben, liegen die wahren Werte der Zielgrößen bei bestimmten Versuchseinstellungen vor. Bevor auf die Regression in Kapitel 5.4.2 eingegangen wird, werden zunächst die sich aus der Regression ergebenden Residuen überprüft. Es erfolgt also inhaltlich eine vorgezogene Rechtfertigung der durchgeführten Regression. In Kapitel 5.4.3 werden die Regressionsmodelle hinsichtlich ihrer Güte durch statistische Kenngrößen bewertet, bevor in Kapitel 5.4.4 die Ergebnisse dargestellt werden. Abschließend erfolgt in Kapitel 5.5 eine kritische Diskussion der Ergebnisse.

#### 5.4.1 Analyse der Daten

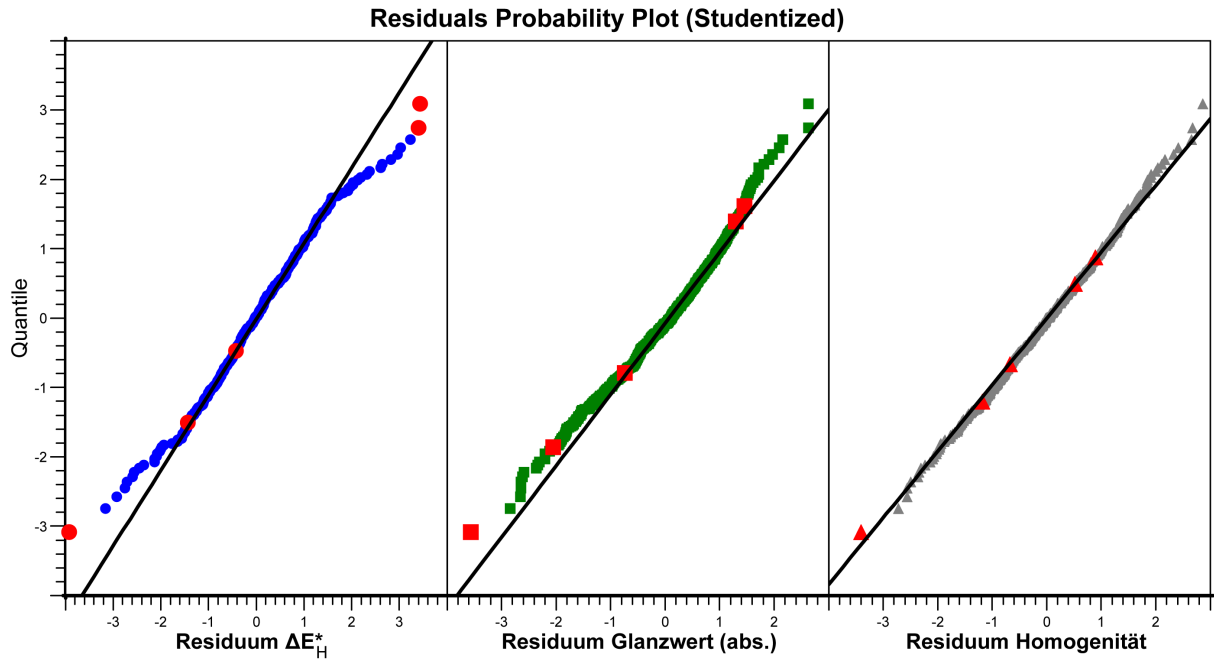
Zur Durchführung einer Regressionsanalyse sind folgende Voraussetzungen zu überprüfen [105]:

1. Sind die Residuen normalverteilt?
2. Sind die Residuen statistisch unabhängig von den Zielgrößen?
3. Sind die Kollinearitäten zwischen den Einflussgrößen hinreichend klein?



4. Ist die Streuung der Residuen kleiner als die erklärbare Streuung des Modells?

Punkt eins kann durch die Darstellung der Residuen im Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung (Residual Probability Plot) für jede Zielgröße überprüft werden [105]. Die Normalverteilung der Residuen ist eine mathematische Grundannahme bei der Durchführung einer Regressionsanalyse.



**Abbildung 5.14:** Betrachtung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Residuen für jede Zielgröße. Markiert sind die größten Ausreißer von der Normalverteilung der Residuen.

Abbildung 5.14 zeigt für jede Zielgröße die Quantile der Standardnormalverteilung aufgetragen über die geordneten Residuen. Die Quantile entsprechen hierbei den  $\sigma$ -Werten dieser Verteilung, wodurch sich 68,28 % der Werte innerhalb des Intervalls  $[-1, +1]$ , 95,45 % zwischen  $[-2, +2]$  und 99,73 % zwischen  $[-3, +3]$  befinden [105]. Die Residuen sind “studentisiert”; das heißt, sie wurden durch ihre Standardabweichung geteilt. Diese Darstellung eignet sich zur Prüfung der Normalverteilung der Residuen eines Regressionsmodells. Je näher die Werte einer Zielgröße an der Geraden liegen, desto mehr hat die Verteilung der Residuen mit einer Normalverteilung gemein und rechtfertigt die durchgeführte Regression. Als Ausreißer (Outlier) werden von *Cornerstone<sup>TM</sup>* diejenigen studentisierten Residuen  $e^*_i$  markiert, deren Beträge den Grenzwert von  $\tilde{x} = 3,29$  überschreiten. Die Berechnung des Grenzwertes erfolgt nach Gleichung 5.7 [119, 120].

$$|e^*_i| > t_{n-p-1}^{-1} \left( 1 - \frac{o_{out}}{2n} \right) \quad (5.7)$$

Wird die Anzahl der Druckproben  $n = 495$  und  $p$  für jede Zielgröße (siehe Kapitel 5.4.3) in Gleichung 5.7 eingefügt, so ergibt sich jeweils ein Freiheitsgrad der t-Verteilung  $r$  größer als 480, der als unendlich

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

angenommen werden kann ( $r = n - p - 1 \approx \infty$ ). Wird zusätzlich der von *Cornerstone*<sup>TM</sup> vorgeschlagene Standardwert  $o_{out} = 0,5$  übernommen, so ergibt sich der gesuchte Grenzwert  $\tilde{x}$  der Umkehrfunktion  $t_{\infty}^{-1}(F(\tilde{x}))$  der t-Verteilung nach Gleichung 5.8. Er kann aus einer Tabelle entnommen werden (z.B. aus [121]). Der Schwellenwert  $o_{out}$  kann, unter der Voraussetzung, dass die Residuen einer Normalverteilung folgen, als erwartete Zahl der akzeptierten Outlier interpretiert werden.

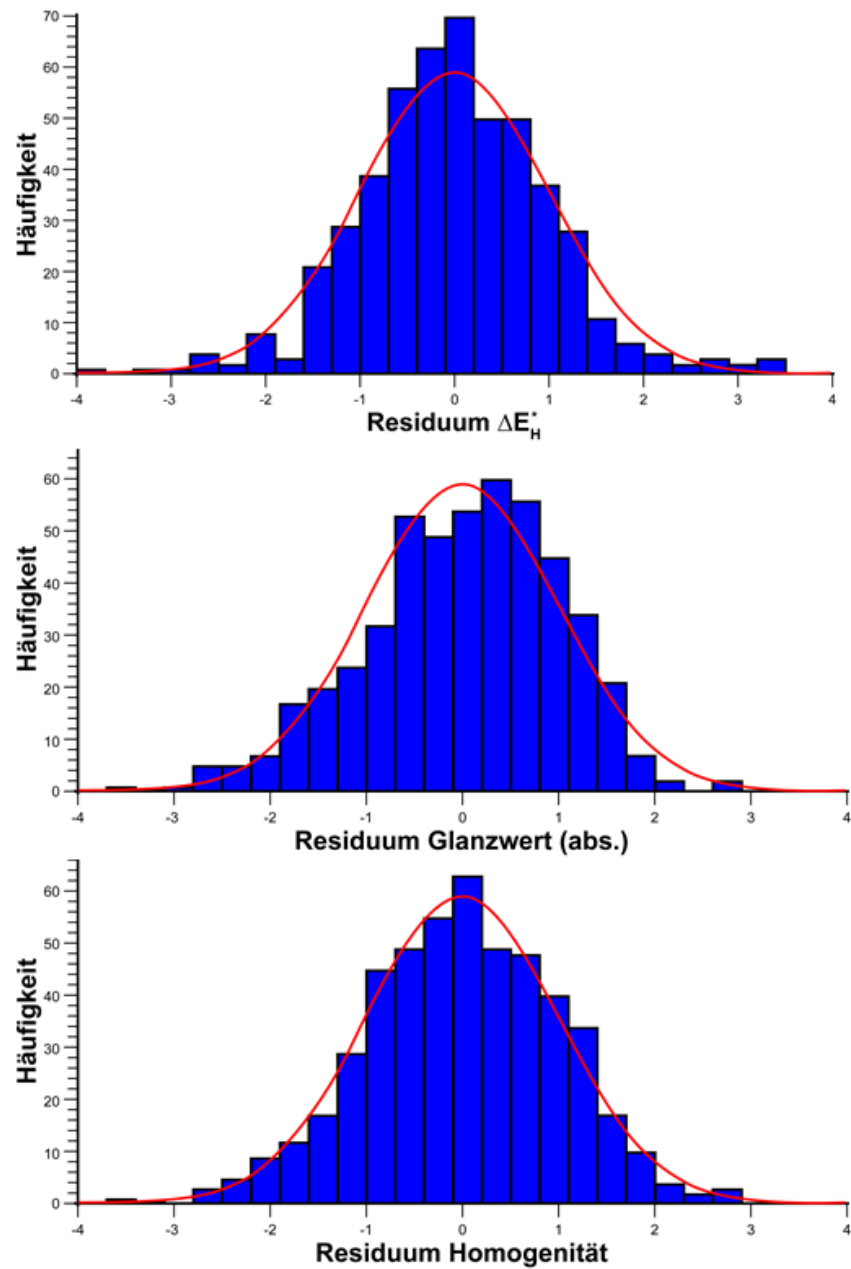
$$\tilde{x} = t_r^{-1} \left( 1 - \frac{o_{out}}{2n} \right) \approx t_{\infty}^{-1} \left( 1 - \frac{0,5}{2 \cdot 495} \right) \approx t_{\infty}^{-1}(0,9995) \approx 3,29 \quad (5.8)$$

Die Residuenverteilung bezüglich der Homogenität folgt sehr genau der eingezeichneten Gerade, was eine Normalverteilung des statistischen Fehlers bestätigt. Lediglich einer der fünf durch *Cornerstone*<sup>TM</sup> markierten Ausreißer in Abbildung 5.14 ist auf die Bewertung der Homogenität zurückzuführen.

Ein Ausreißer ist ebenfalls bei den Glanzwerten vorhanden. Bei betragsmäßig höheren Residuen treten leichte Abweichungen zur idealen Normalverteilung auf, die jedoch die Aussagekraft des Regressionsmodells kaum schmälern, was durch den Ausschluß dieser Werte aus dem Regressionsmodell überprüft wurde. In weiten Bereichen wird die Normalverteilung der Residuen gut eingehalten.

Der Verlauf der Residuen beim Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) weicht im Vergleich zu denen der beiden anderen Zielgrößen, bei größeren Werten sichtbar von einer Standardnormalverteilung ab. Hier liegen insgesamt drei Ausreißer - zwei bei betragsmäßig höheren Residuen - vor. Werden die Abweichungen der betragsmäßig höheren Residuen zur eingezeichneten Gerade der Standardnormalverteilung interpretiert, so besteht die Möglichkeit, dass bei der Regressionsanalyse fälschlicherweise ein höheres Vertrauensniveau angenommen wird, als tatsächlich vorliegt. Das bedeutet, dass dadurch das Modell besser erscheinen kann, als es real ist. Im mittleren Bereich der Residuen wird die Normalverteilung, wie bei den anderen Zielgrößen sehr gut eingehalten. Die Residuenverteilung erwies sich nach einer zusätzlichen Messung mit dem Mehrwinkelspektrofotometer *MA98* von *X-rite* als sehr ähnlich, was die Messwerte der Proben bestätigt. Bei einer Untersuchung von 495 Druckproben hinsichtlich drei Qualitätsmerkmalen ist eine gesamte Ausreißerquote von 1% zusammenfassend als sehr gut einzustufen.

Die Normalverteilung der Residuen lässt sich auch durch die Darstellung der Residuen in einem Histogramm visualisieren. Aus Abbildung 5.15 ist ersichtlich, dass die eingezeichnete Dichtefunktion der Normalverteilung am besten bei den Residuen der Homogenität erreicht wird. Die Verteilung der Residuen des Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) ist ebenfalls sehr nahe an einer Normalverteilung. Beim Glanz weicht die Verteilung etwas nach rechts von einer Normalverteilung ab. Von den fünf in Abbildung 5.14 markierten Ausreißern befinden sich in Abbildung 5.15 drei jeweils an den linken Enden der Verteilung zwischen den studentisierten Residuen  $-3,3$  und  $-4$ ; die beiden anderen am äußersten rechten Rand der Residuenverteilung des Color-Shift.



**Abbildung 5.15:** Betrachtung der Residuen als Histogramm für jede Zielgröße. Die Normalverteilung wird bei der Homogenität am besten erfüllt.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

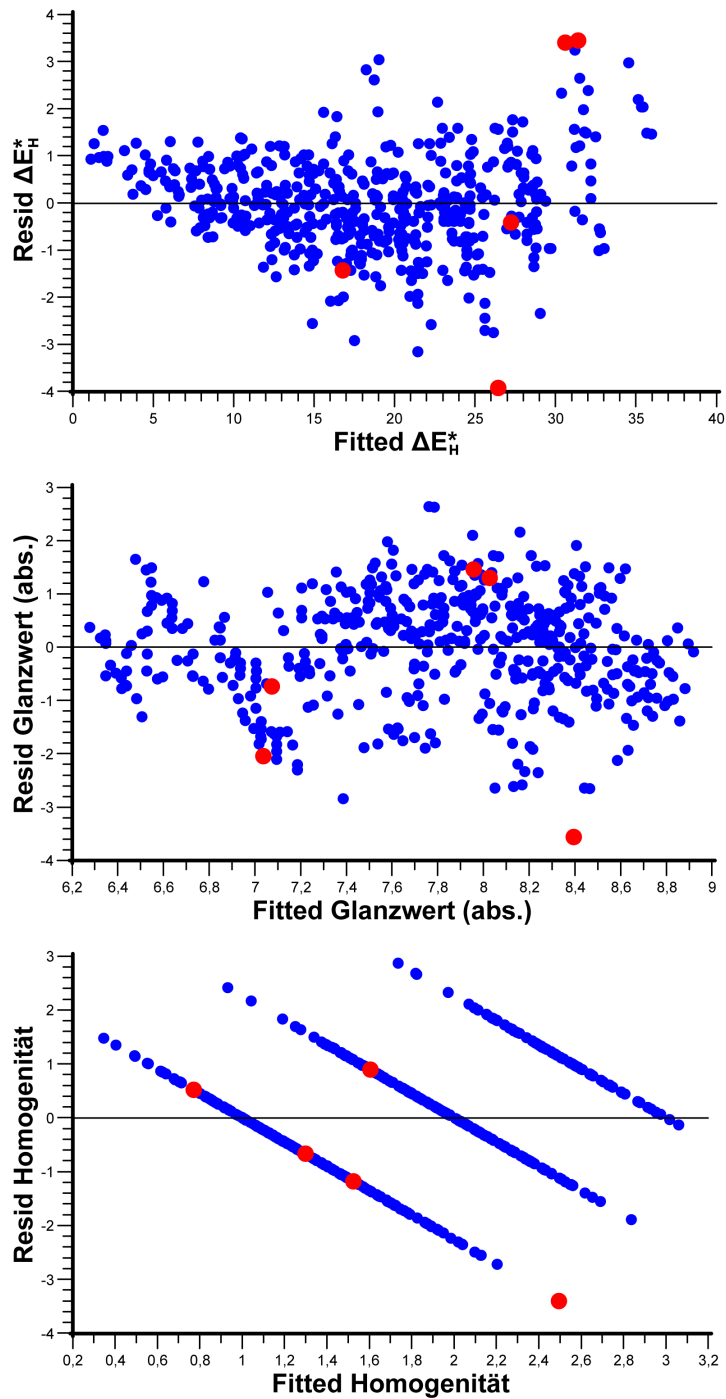


Abbildung 5.16: Residuenverteilung über die Zielgrößen

Die Unabhängigkeit der Residuen von den Zielgrößen (Punkt 2 der Voraussetzungen, siehe Beginn Kapitel 5.4.1) lässt sich durch die Verteilung der Residuen über die Zielgrößen überprüfen. In Abbildung 5.16 sind die einzelnen Residuen über die Zielgrößen aufgetragen. Markiert sind dieselben Ausreißer, die bereits oben erwähnt wurden. Durch eine mehr oder weniger gleichmäßig verteilte Punktwolke kann beim Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) und Glanz von einer statistischen Unabhängigkeit der Residuen ausgegangen werden. Dies ist bei der Homogenität nicht der Fall. Die drei aus den Punkten gebildeten Geraden und deren gleichmäßigen Abstände sind auf die in Kapitel 3.2.3 beschriebene dreistufige visuelle Bewertungsskala zurückzuführen. Da *Cornerstone<sup>TM</sup>* bei der Homogenität, wie bei allen Zielgrößen, von einer kontinuierlichen Größe ausgeht, entsteht diese eher seltsame Form der Residuenverteilung. Eine statistische Unabhängigkeit von der Zielgröße ist dadurch nicht gegeben. Da die Homogenität der gedruckten Schicht nicht gemessen, sondern unter den genannten Bedingungen lediglich visuell von zwei Personen bewertet wurde, kommt der Regression ohnehin keine große Bedeutung zu. Sie ist mit oder ohne einer ungleichmäßigen Verteilung kritisch zu betrachten.

Für Punkt drei sind die Einflussgrößen auf Kollinearität zu überprüfen. In Kapitel 3.2 konnten keine bedeutenden Kollinearitäten der Einflussgrößen festgestellt werden. Liegen Kollinearitäten vor, so können Veränderungen der Zielgröße nicht eindeutig durch das Modell auf die Einflussgrößen zurückgeführt werden und umgekehrt, was die Aussagekraft des Regressionsmodells schmälert. Einen Überblick über vorliegende Kollinearitäten der Einflussgrößen liefert die Betrachtung der Korrelationskoeffizienten für jede Zielgröße. Die Koeffizienten, die aufgrund ihrer Berechnung (siehe Gleichung 5.9) Werte zwischen  $[-1; 1]$  einnehmen, werden in Korrelationsmatrizen dargestellt, die sich im Anhang B (Abbildung B.1) befinden.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1) \cdot (x_{i2} - \bar{x}_2)}{(n-1) \cdot \sigma_{x_1} \cdot \sigma_{x_2}}; \quad (\text{siehe}[105]) \quad (5.9)$$

Die Korrelationskoeffizienten  $\rho$  beschreiben dabei die linearen Zusammenhänge der Einflussgrößen untereinander. Eine Normierung von  $\rho$  erfolgt durch das Produkt der Standardabweichungen der beiden Einflussgrößen  $\sigma_{x_1}$  und  $\sigma_{x_2}$  im Nenner. Besitzen die Korrelationskoeffizienten betragsmäßig hohe Werte, so sind lineare Zusammenhänge der entsprechenden Größen sehr wahrscheinlich. Liegen die Korrelationskoeffizienten nahe bei Null, so können Änderungen der Zielgrößen eindeutig auf eine Änderung der Einflussgröße zurückgeführt werden. Es liegen keine Kollinearitäten der betreffenden Einflussgrößen vor. Ist  $|\rho| > 0,5$ , so wird im Folgenden von einer starken Korrelation der betroffenen Einflussgrößen gesprochen. Im Anhang B können die einzelnen Koeffizienten der Korrelationsmatrizen eingesehen werden. Bei der Betrachtung der Korrelationsmatrix zum Color-Shift werden die starken Korrelationen folgendermaßen interpretiert:

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

- Die Korrelation der “Geschwindigkeit” mit “t bis Trockner” liegt an der in Kapitel 5.2.4 erklärten linearen Abhängigkeit der beiden Größen. Es muss fortan berücksichtigt werden, dass durch das Regressionsmodell die Auswirkungen dieser Größen nicht eindeutig trennbar sind.
- “Pigmentkonzentration” und “Bedruckstoff” korrelieren ebenfalls stark, was daran liegt, dass alle auf OPP-Folie gedruckten Proben bei einer Pigmentkonzentration von 30 % hergestellt wurden. Dies geschah, weil bei der Versuchsplanung die Einschränkung, dass bei der Folie aufgrund des fehlenden Wegschlageffekts zur Trocknung beide Heißlufttrockner notwendig sind, nicht berücksichtigt wurde. Bei zwei Versuchskonfigurationen war durch den Einsatz je eines Heißlufttrockners keine vollständige Trocknung der Effektpigmentschicht möglich. Anstatt den zweiten Heißlufttrockner einzuschalten, wurde der Bedruckstoff geändert. Da ein großer Einfluss der Trocknereinstellungen vermutet wurde, sollte diese Einstellungen nicht verändert werden. Beim Color-Shift ist somit die Korrelation der “Pigmentkonzentration” mit dem “Bedruckstoff” bei der Auswertung zu beachten.
- Weitere Korrelationen ergeben sich bei den einzelnen Trocknungsgrößen und den damit verbundenen prozessbedingten Einschränkungen in der Versuchsplanung. Dies betrifft sowohl die Trocknungseinflussfaktoren untereinander als auch in Verbindung mit dem Bedruckstoff, der ebenfalls in den Einschränkungsbedingungen vertreten ist.

Die oben genannten Korrelationen treten ebenfalls bei den Glanzwerten auf. Da die Zeit bis zum Trocknerbeginn auf den Glanz keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird sie aus dem Regressionsmodell entfernt (siehe Kapitel 5.4.3) und fehlt in der Matrix (siehe Abbildung B.1).

Bei der Homogenität ist die Korrelation zwischen “Geschwindigkeit” und “t bis Trockner” wieder vorhanden und  $\rho$  hat zufällig denselben Korrelationskoeffizient wie bezüglich des Color-Shift. Das bedeutet, dass die subjektive Bewertung der Homogenität der gedruckten Schichten denselben Korrelationskoeffizient liefert wie die messtechnische Erfassung des Color-Shift. Ansonsten sind bei der Homogenität nur die prozessbedingten Wechselwirkungen der IR-Trocknung mit der Heißlufttrocknung in der Korrelationsmatrix der Einflussgrößen auffällig, die oben bereits erklärt wurden. Die Voraussetzungen für eine Regressionsanalyse sind gegeben, sofern bei der Interpretation der Ergebnisse die aufgezeigten Kollinearitäten berücksichtigt werden.

Punkt 4 der Voraussetzungen (siehe Beginn Kapitel 5.4.1) wird durch die Betrachtung der Bestimmtheitsmaße (siehe Gleichung 5.12) überprüft. Die erklärbare Streuung des Modells ist größer als die der Residuen, falls das Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells  $> 0,5$  ist. Diese Voraussetzung ist in unserem Fall für alle Zielgrößen gegeben (siehe Abbildung 5.17).

Nachdem gezeigt wurde, dass die Voraussetzungen für eine Regressionsanalyse erfüllt sind, gilt es jetzt die Koeffizienten des hypothetischen Regressionsmodells zu bestimmen.

### 5.4.2 Regressionsmodell

Die Versuchsauswertung erfolgt über die Bildung einer linearen Regression für jede Zielgröße. Dabei wird die Abhängigkeit der wahren Werte jeder Zielgröße von den Einflussgrößen auf eine mathematische Funktion zurückgeführt [117]. Regressionsmodelle sind quantitative Modelle, die die Zielgrößen (Qualitätsmerkmale) als Funktion der Einflussgrößen (Faktoren) darstellen [105]. Aus der hypothetischen Regressionsgleichung (siehe Gleichung 5.2) werden dazu die unbekannten Koeffizienten bestimmt. Dies geschieht durch die Analyse der Koeffizientenmatrix  $\mathbf{X}$ , deren Zeilenzahl der Anzahl an Proben entspricht (hier:  $n = 495$ ) und deren Spaltenzahl  $p$  von der Anzahl und Art der Einflussfaktoren sowie von den zu berücksichtigenden Wechselwirkungen und Effekten höherer Ordnung abhängt (siehe Gleichung 5.10). Bei einem linearen Modell ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen und nur kontinuierlichen Einflussgrößen entspricht die Anzahl der Spalten der Anzahl der Einflussgrößen plus eins ( $p = m + 1$ ). In anderen Fällen können statt den Werten der Einflussgrößen  $x_{ij}$  weitere Terme stehen. Die Spaltenanzahl vergrößert sich. Der Vektor  $\vec{y}$  stellt das Ergebnis der Versuchsläufe dar und wird durch das Beschreibungsmodell angenähert. Letzter ist eine Linearkombination der Einflussgrößen und der gesuchten Koeffizienten  $b_j$ .

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

Um die Koeffizienten von  $\vec{b}$  zu bestimmen, gilt es, sich der Gleichung

$$\vec{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \vec{y} \quad (5.11)$$

möglichst gut anzunähern. Dies erfolgt bei einem D-optimalen Versuchsplan durch eine Maximierung der Determinante von  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ . Als Voraussetzung dafür zählt die Invertierbarkeit der Matrix  $\mathbf{X}$  und die gleiche Normierung aller Einflussgrößen (vgl. [105, 111]). *Cornerstone<sup>TM</sup>* übernimmt diese Aufgaben unter der Berücksichtigung der Einschränkungen. Zum tieferen Verständnis der Regressionsanalyse sei auf einschlägige Literatur (z.B. [122]) verwiesen, wo einzelne Rechenschritte aufgezeigt sind [100]. Die Berechnung der Koeffizienten  $\vec{b}$  und damit die Bestimmung des Regressionsmodells übernimmt ebenfalls *Cornerstone<sup>TM</sup>*. Nach der Durchführung der Regressionen für die verschiedenen Zielgrößen und deren Rechtfertigung (siehe Kapitel 5.4.1), erfolgt die Charakterisierung der Güte der ermittelten Regressionsmodelle.

### 5.4.3 Regressionsanalyse

Bei der Regressionsanalyse werden sowohl der statistische Fehler  $\vec{e}$  und die Komponenten von  $\vec{b}$  bezüglich ihrer Streuung und Signifikanz untersucht als auch die Güte der Regression bestimmt [111]. Dazu werden folgende Kennwerte verwendet (vergleiche [117]):

- Bestimmtheitsmaß  $R^2$
- RMS-Error (Root Mean Square-Error, mittlere quadratische Abweichung) oder Standardabweichung der Residuen  $\sigma_R$
- Signifikanz der Koeffizienten

Die größte Bedeutung wird dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zuteil. Es beschreibt den durch das Modell erklärten Anteil an der Gesamtvariabilität der Daten [100] und wird nach folgender Gleichung berechnet (vergleiche [105]):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sigma_{\hat{y}}^2}{\sigma_y^2} \quad (5.12)$$

Das Bestimmtheitsmaß ist der Quotient der Varianz der geschätzten zu der Varianz der gemessenen Werte. Sein Wert liegt damit zwischen 0 und 1.  $\hat{y}_i$  ist der durch das Modell geschätzte Wert einer Zielgröße des Versuchs  $i$ . Je größer das Bestimmtheitsmaß ist, desto genauer lässt sich die Zielgröße durch das in unserem Fall lineare Regressionsmodell erklären. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R_{adj}^2$  verhindert im Gegensatz zum gewöhnlichen ( $R^2$ ) ein nur durch eine Vergrößerung der Anzahl an Einflussfaktoren bedingtes Ansteigen des Bestimmtheitsmaßes. Bei einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden, sind beide Bestimmtheitsmaße sehr ähnlich und können äquivalent betrachtet werden. Der RMS-Error  $\sigma_R$  beschreibt die durch das Modell nicht erklärbare Reststreuung. Je kleiner die Standardabweichung der Residuen  $\sigma_R$  (siehe Gleichung 5.13) ist, desto besser beschreibt das Regressionsmodell den gemessenen Zielwert und um so höher ist die Güte des Modells.

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n-p} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.13)$$

Der RMS-Error  $\sigma_R$  wird auch als Streuung bezeichnet und beschreibt die Standardabweichung der Residuen  $e_i = y_i - \hat{y}_i$ . Der Wert  $(n-p)$  entspricht dem Freiheitsgrad der Regression, der sich aus der Anzahl der Versuche  $n$  und aus der Anzahl der Terme im Modell  $p$  ergibt. Letzterer ist wiederum abhängig von der Art und Anzahl der Einflussgrößen. Hier beträgt die Anzahl der Versuche  $n = 495$  und der Wert  $p = 14$ . Dies lässt sich mit Tabelle 5.1 bei Betrachtung der Auswertungssicht nachvollziehen:  $p$  ergibt sich aus der Summe aus Konstante (1), linearer Terme (11) und den zusätzlichen Freiheitsgraden der diskreten Größen mit mehr als zwei Stufen (2). Werden Einflussgrößen - z.B. aufgrund ihrer geringen Signifikanz -



aus dem Regressionsmodell entfernt, so erhöht sich dadurch der Freiheitsgrad je nachdem wie stark sich  $p$  verringert.

Die letzte herangezogene statistische Größe zur Beurteilung der Regressionsgüte ist die Signifikanz der bestimmten Koeffizienten  $\vec{b}$ . Ein Einflussfaktor kann als signifikant bezeichnet werden, wenn dessen Irrtumswahrscheinlichkeit entsprechend gering (z.B.  $< 0,05$ ) ist. Die Irrtumswahrscheinlichkeit ("p-Wert") gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine auf einen Einflussfaktor zurückgeführte Veränderung der Zielgröße falsch ist. Damit kann somit die Frage der Wichtigkeit der einzelnen Einflussfaktoren im Hinblick auf die Zielgrößen abgeschätzt werden. Unwichtige Einflussfaktoren können aus dem Regressionsmodell entfernt und aus den restlichen die Haupteinflussgrößen bestimmt werden.

Alle genannten Größen werden nach der Durchführung der Regressionen für die verschiedenen Zielgrößen von *Cornerstone<sup>TM</sup>* in Tabellenform (siehe Abbildung 5.17) angezeigt. Zum Vergleich ist ebenfalls die Regression, die sich aus dem mit dem Mehrwinkelspektrofotometer *MA98* gemessenen Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) ergibt, angegeben. Nachfolgend wird immer über den mit dem *FX10* gemessenen Color-Shift gesprochen. Dies ist sinnvoll, da Messungen zeitnah nach den Druckversuchen durchgeführt wurden und das Bestimmtheitsmaß um 5 % höher liegt.

Normalerweise werden Einflussfaktoren, deren Irrtumswahrscheinlichkeit  $> 0,1$  ist, aus dem Regressionsmodell entfernt, da damit die Wahrscheinlichkeit steigt, irrtümlicherweise den Einfluss jener Größen überzubewerten. Der Einflussfaktor gilt somit als nicht signifikant. Wir differenzieren jedoch aus den nachfolgend genannten Gründen bei jeder Einflussgröße und weichen dadurch von der allgemeinen Vorgehensweise ab.

Beim Color-Shift weist der Bedruckstoff eine sehr hohe Irrtumswahrscheinlichkeit auf, die durch die geringe Anzahl an Foliendruckproben begünstigt wird. Da sich durch die insgesamt hohe Zahl an Freiheitsgraden (Residual  $df$ ) eine Herausnahme des Bedruckstoffs als Einflussgröße aus dem Regressionsmodell ("Out") so gut wie gar nicht auf die Gütemaße "R-square" ( $R^2$ ), "Adj R-Square" ( $R_{adj}^2$ ) und "RMS-Error" ( $\sigma_R$ ) und die p-Werte der anderen Einflussgrößen auswirkt, verbleibt dieser im Regressionsmodell. Der Einfluss des Bedruckstoffs muss aufgrund der geringen Balanciertheit ohnehin relativiert werden, da er bezüglich des Color-Shift bei der Messung mit dem *MA98* einen p-Wert von  $5,7 \cdot 10^{-4}$  besitzt (siehe Abbildung 5.17). Alle anderen Einflussgrößen können aufgrund ihrer geringen p-Werte als signifikant bezeichnet werden. Die Bestimmtheitsmaße (R-Square und Adj R-Square) liegen bei unserer linearen Regression bei knapp 0,85. Die Schätzwerte streuen mit einem RMS-Error von 3,2 um ihren geschätzten  $\Delta E_H^*$ -Wert. Die Größe dieser Streuung liegt bereits in dem Bereich, der visuell vom menschlichen Auge wahrgenommen wird. Eine geringere Streuung wäre wünschenswert, wird aber auch durch eine Messung mit einem zweiten Mehrwinkelspektrofotometer nicht erreicht. Es wird vermutet, dass die Streuung auf nicht berücksichtigte Störgrößen, die starke Streuung der Mehrwinkelspektrofotometer bei Messungen

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

Term	Color-Shift $\Delta E_{\text{H}}^*$ FX10	Glanz	Homogenität	Color-Shift $\Delta E_{\text{H}}^*$ MA98
Constant	0,00105993 1 df In	0,00000 1 df In	0,00000 1 df In	0,684877 1 df In
Bedruckstoff	0,508491 1 df In	0,00000 1 df In	0,913944 1 df Out	0,000571414 1 df In
Pigmentart	0,00000 3 df In	0,00000 3 df In	1,77811e-11 3 df In	0,00000 3 df In
Pigmentkonz.	0,00000 1 df In	0,00000 1 df In	2,33870e-05 1 df In	2,49557e-08 1 df In
HL-Trockner 1	0,00000 1 df In	4,00452e-09 1 df In	1,23167e-10 1 df In	0,00000 1 df In
HL-Trockner 2	0,0164014 1 df In	0,000120211 1 df In	0,000434953 1 df In	0,0362576 1 df In
IR-Strahler 1	3,71492e-12 1 df In	0,00295542 1 df In	1,22014e-05 1 df In	5,06334e-10 1 df In
IR-Strahler 2	0,000134086 1 df In	0,328924 1 df In	0,0924001 1 df In	0,0250346 1 df In
Druckgeschw.	1,02608e-06 1 df In	0,00644483 1 df In	0,00000 1 df In	0,000112213 1 df In
Schöpfvol.	0,00000 1 df In	1,89372e-11 1 df In	0,00000 1 df In	0,00000 1 df In
Tonwert	0,00000 1 df In	0,00000 1 df In	0,00317247 1 df In	0,00000 1 df In
t bis Trockner	1,09912e-14 1 df In	0,766612 1 df Out	2,97185e-06 1 df In	9,01177e-10 1 df In
<b>R-Square</b>	<b>0,8486</b>	<b>0,8799</b>	<b>0,6507</b>	<b>0,8020</b>
<b>Adj R-Square</b>	<b>0,844523</b>	<b>0,876893</b>	<b>0,642014</b>	<b>0,796604</b>
<b>RMS Error</b>	<b>3,2178192</b>	<b>0,239037261</b>	<b>0,449954261</b>	<b>3,547328297</b>
<b>Residual df</b>	<b>481</b>	<b>482</b>	<b>482</b>	<b>481</b>

**Abbildung 5.17:** Überblick über die Güte der gebildeten Regressionsmodelle. Für jede Einflussgröße ist die Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert), ihr Freiheitsgrad ( $df$  = degree of freedom) und die Berücksichtigung im Modell bezüglich der Zielgrößen (“In” oder “Out”) angegeben. Unten sind die erwähnten Gütemaße aufgelistet.

nahe am Glanzwinkel (vgl. Kapitel 3.2.2) und den hohen Anteil an inhomogenen Druckproben zurückzuführen ist, was in Kapitel 5.5 noch diskutiert wird.

Beim Glanz sind die Faktoren “IR-Trocknung 2” und “t bis Trockner” nicht signifikant (p-Wert größer als 0,1). Letztere Größe wird deshalb aus dem Modell entfernt, wodurch sich die Irrtumswahrscheinlichkeit der erstgenannten Einflussgröße weiter erhöht. Diese wird trotzdem nicht aus dem Regressionsmodell genommen, da der Unterschied der p-Werte zur Einflussgröße “IR-Trocknung 1” nicht erklärt werden kann. Folgerichtig müsste diese, da beide Trocknermodule immer hintereinander eingesetzt werden, eine ähnliche Signifikanz aufweisen wie “IR-Trocknung 2”. Das Bestimmtheitsmaß ist beim Glanz mit 0,88 etwas höher als beim Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte); die Streuung scheint geringer. Wird allerdings berücksichtigt, dass sich die absoluten Glanzwerte im Bereich zwischen 6,20 und 8,97 bewegen, beträgt die relative Streuung beim Glanz 8,6 % im Gegensatz zu 8,1 % beim Color-Shift. Sie ist also bezogen auf den ausgeschöpften Messbereich ähnlich groß wie beim Color-Shift.

Bei der Homogenität erweisen sich alle Einflussgrößen bis auf den Bedruckstoff als signifikant. Deshalb wird letzterer aus dem Modell entfernt, wodurch sich die p-Werte einiger anderer Einflussgrößen verkleinern. Die Bestimmtheitsmaße liegen bei ca. 0,65 und sind somit die geringsten unter den Zielgrößen. Dies resultiert vermutlich aus der einmaligen visuellen Einteilung der Druckproben in drei Stufen von zwei Personen. Die Gütemaße sind für unsere Zwecke jedoch ausreichend.

#### 5.4.4 Ergebnisse und physikalische Interpretation

Einen guten Überblick über die Ergebnisse der Regressionsanalysen geben die Pareto-Diagramme der Einflussgrößen (siehe Abbildungen 5.18, 5.21 und 5.22). Sie zeigen die relativen Einflüsse der Größen auf eine Zielgröße in geordneter Reihenfolge. Ein negativer Einfluss auf eine Zielgröße kann dabei nur von einer kontinuierlichen Größe hervorgerufen werden. Dieser bedeutet bei einer linearen Regression eine indirekte Proportionalität zwischen der Einfluss- und Zielgröße. Da die Werte der Effekte der Einflussgrößen orthogonal skaliert sind, werden sie nicht durch verschiedene Einheiten beeinflusst und können so vergleichend gegenübergestellt werden.

Abbildung 5.18 zeigt die relativen Einflüsse auf die Zielgröße Color-Shift. Die Pigmentart und das Schöpfvolumen haben den größten Einfluss auf den Color-Shift. Bei der Pigmentart weist das *Colorstream*<sup>®</sup> Pigment *T10-02 Arctic Fire* mit seiner Farbänderung von grün nach rot den größten Color-Shift auf. Die 53 höchsten gemessenen  $\Delta E_H^*$ -Werte werden mit dem *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigment und 21 der 30 höchsten  $\Delta E_H^*$ -Werte mit dem höchsten Schöpfvolumen erreicht. Heißlufttrocknung scheint im Gegensatz zur IR-Trocknung den Color-Shift zu begünstigen [31]. Der Bedruckstoff hat kaum einen Einfluss auf den Color-Shift, was auch auf seine hohe Irrtumswahrscheinlichkeit zurückgeführt werden kann, da diese in die Berechnung eingeht. Den größten negativen Einfluss hat “t bis Trocknerbeginn”, was mit einem steigenden Color-Shift bei kurzer Distanz bis zum Trocknermodul übereinstimmt. Lange Zeiten bis zum

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

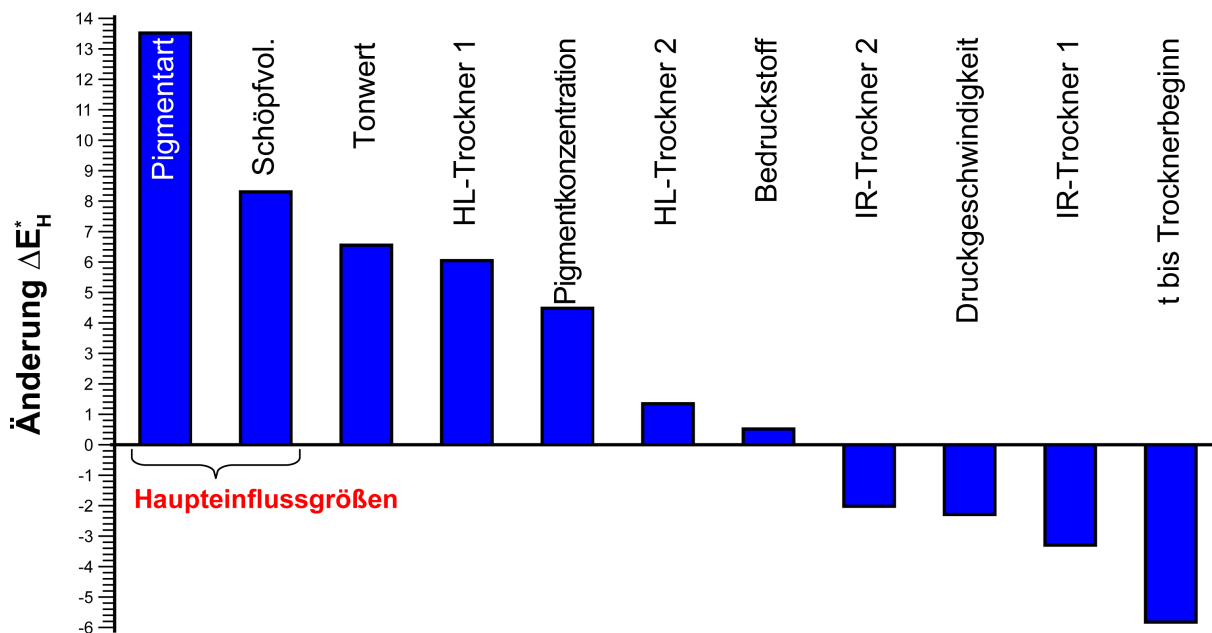
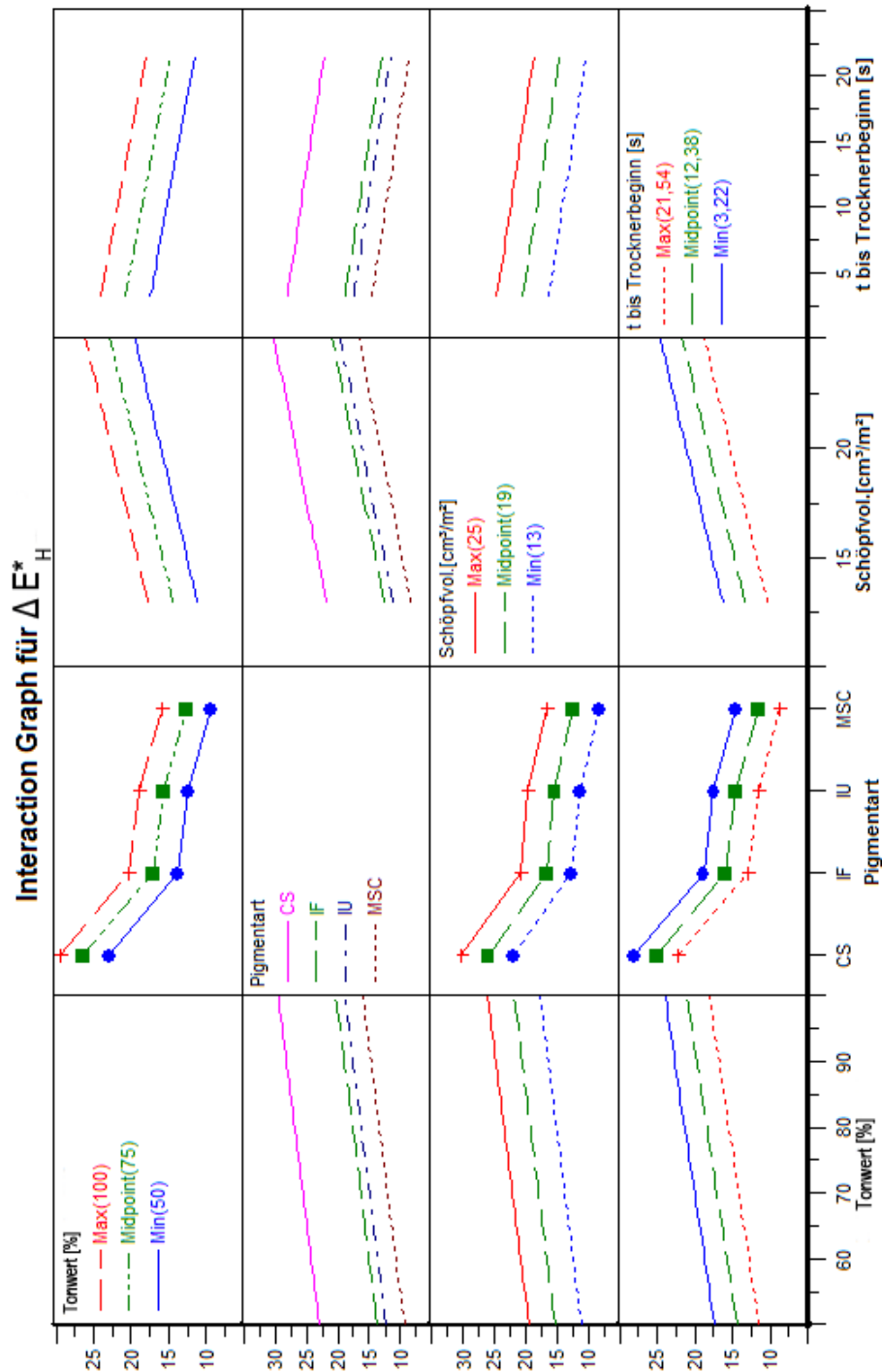


Abbildung 5.18: Einflüsse auf den Color-Shift. Pareto-Diagramm der Einflussgrößen

Trockner werden ebenfalls in [1] und [84] als negativ, durch eine mögliche Umlagerung der Pigmente, gedeutet. Die negative Auswirkung der Druckgeschwindigkeit widerspricht diesem Prinzip. Es ist jedoch möglich, dass eine geringere Dynamik die flache Orientierung der Pigmente und damit den Color-Shift begünstigt.

Die Auswirkungen der Einflussgrößen auf eine Zielgröße können ebenfalls durch den sogenannten “Interaction Graph” dargestellt werden (siehe Abbildung 5.19). Um eine gute Übersicht gewährleisten zu können, werden neben den in den Pareto-Diagrammen festgelegten Haupteinflussgrößen der Tonwert und die Zeit bis zum Trocknerbeginn einbezogen. Da letztere den größten negativen Einfluss auf den Color-Shift besitzt, ist sie unter anderem Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 6.

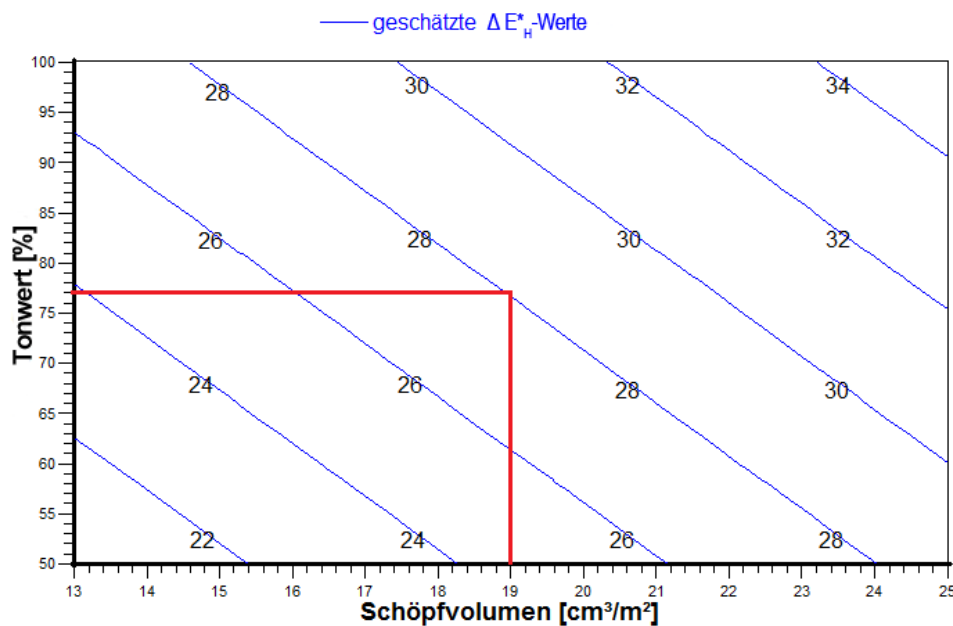
In Abbildung 5.19 sind für den Color-Shift die  $\Delta E_H^*$ -Werte über die Stufen der Einflussgrößen Tonwert, Pigmentart, Schöpfvolumen und Zeit bis Trocknerbeginn in einer Matrix aufgetragen. Für jeden Einflussfaktor können dabei die Auswirkungen auf den Color-Shift, die sich in Abhängigkeit von den Einstellungen verschiedener Einflussgrößen ergeben, abgelesen werden. Durch eine lineare Regression ergeben sich bei den kontinuierlichen Einflussgrößen Geraden als Regressionskurven. Je größer deren Steigungen sind, desto stärker sind die Auswirkungen der betreffenden Einflussgröße auf die Zielgröße (spaltenweise Betrachtung der Felder in Abbildung 5.19). Die Einflüsse der verschiedenen Pigmentarten auf den Color-Shift sind gut zu erkennen. Die Abstände der parallelen Regressionsgeraden (zeilenweise Betrachtung der Felder) spiegeln die Unterschiede zwischen den einzelnen Stufen eines Einflussfaktors wider. Während die Geraden der Zeile “t bis Trocknerbeginn” eng beieinander liegen, sind die der Pigmentart weiter vonein-



**Abbildung 5.19:** Darstellung der Beeinflussung des Color-Shift ( $\Delta E^*_H$ -Werte) durch einige Einflussfaktoren im mit *Cornerstone*<sup>™</sup> erstellten Interaction Graph (Abkürzungen in Abbildung 5.9). Die Auswirkungen auf den Color-Shift in Abhängigkeit von den Einstellungen verschiedener Einflussgrößen können abgelesen werden. Je größer die Steigungen der Regressionsgeraden sind, desto stärker sind die Auswirkungen der Einflussgröße dieser Spalte auf den Color-Shift. Je größer die Abstände der Regressionsgeraden sind, desto stärker unterscheiden sich die Auswirkungen der Stufen der Einflussgröße der betreffenden Zeile auf die Zielgröße.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

ander entfernt. Die größte Steigung beziehungsweise der größte Abstand der Geraden liegt zwischen den Pigmentarten *Colorstream® Arctic Fire* und *Iriodin® Rutil Feinrot*, wodurch der Wahl der Pigmentart die wichtigste Bedeutung bezüglich des Color-Shift zukommt. Wären bei dem linearen Regressionsmodell zusätzlich Wechselwirkungen der Einflussgrößen berücksichtigt worden, so könnten sich die Steigungen der Geraden der einzelnen Stufen der Einflussfaktoren auch unterscheiden.



**Abbildung 5.20:** Darstellung der Beeinflussung des Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) bei gedruckten *Colorstream® Arctic Fire* Pigmenten durch zwei Einflussfaktoren bei einem linearen Regressionsmodell. Aufgetragen ist der Tonwert über dem Schöpfvolumen. Eingezeichnet sind die Trajektorien gleicher  $\Delta E_H^*$ -Werte, die bei einem linearen Regressionsmodell Geraden darstellen. Die restlichen Einflussfaktoren haben dabei folgende konstante Einstellungen: Pigmentkonz. = 20 %, Heißlufttrockner 1 und 2 = ein, IR-Trockner 1 und 2 = je 1 Strahler ein, Bedruckstoff = MS, Druckgeschw. =  $30 \frac{m}{min}$ , t bis Trockner = 10 s.

Die Auswirkungen der Einstellungen zweier kontinuierlicher Einflussgrößen können in *Cornerstone™* auch als “Contour Plot” aufgezeigt werden (siehe Abbildung 5.20). Dazu werden diese bei konstanten übrigen Einflussgrößen gegeneinander aufgetragen. Eingezeichnet sind die nach dem Regressionsmodell berechneten Geraden gleicher  $\Delta E_H^*$ -Werte. Werden *Colorstream® Arctic Fire* Pigmente mit einer Rasterwalze (HIT-Gravur), die ein theoretisches Schöpfvolumen von  $19 \frac{cm^3}{m^2}$  besitzt, bei den in Abbildung 5.20 angegebenen Einstellungen der übrigen Einflussparameter verdruckt, so wird nach dem Regressionsmodell ein Tonwert von 77 % benötigt, um einen  $\Delta E_H^*$ -Wert von 28 zu erreichen (siehe rote Linien). Interessanter und besonders sinnvoll ist diese Darstellung bei Regressionsmodellen höherer Ordnung und einer Berücksichtigung von Wechselwirkungen, wo die Geraden in Kurven übergehen.

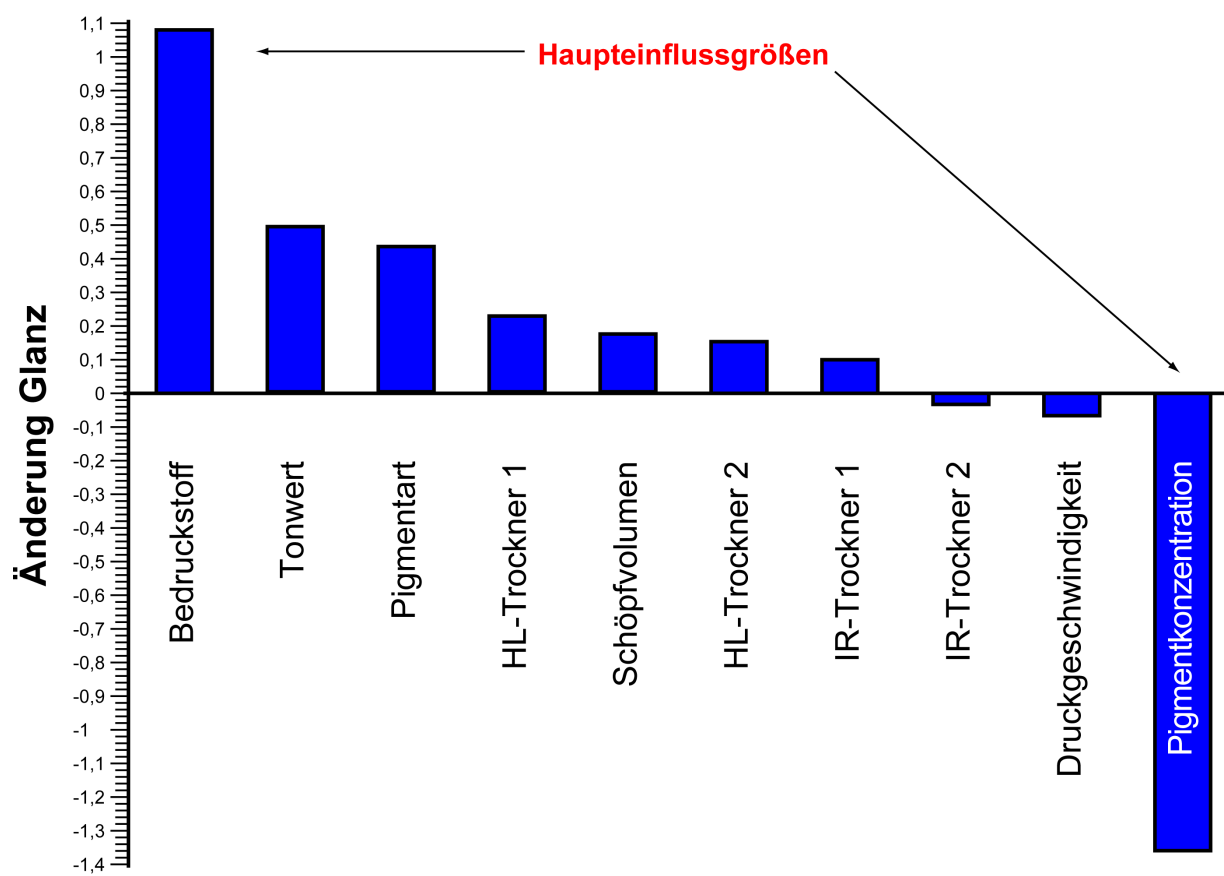


Abbildung 5.21: Einflüsse auf den Glanz. Pareto-Diagramm der Einflussgrößen

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MIT HILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

Das Pareto-Diagramm für den Glanz ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Den größten Einfluss auf den Glanz hat die Pigmentkonzentration gefolgt vom Bedruckstoff. Mit steigender Pigmentkonzentration sinkt der Glanz. Dies ist aus physikalischer Sicht nachvollziehbar, da sich die einzelnen Pigmente bei höheren Pigmentkonzentrationen nicht mehr so gut flach nebeneinander auf dem Bedruckstoff positionieren können. Sie liegen zum Teil übereinander und verschlechtern damit die nach der DIN 16537 [71] durchgeführte Glanzmessung (siehe Kapitel 3.1.2). Insgesamt ist der Glanz der auf Folien gedruckten Proben höher als der der Papierproben. Da sich die absoluten Glanzwerte der unbedruckten Bedruckstoffe ebenso verhalten wie in Kapitel 4.1, ist dieses Ergebnis nachvollziehbar [31]. Je glänzender der Bedruckstoff ist, desto höher ist auch der Glanzwert nach dem Bedrucken mit Effektpigmentfarben zu erwarten. Da sich jedoch die erste Folienprobe bei einem absteigenden Ranking des Glanzwerts erst an 66. Position befindet, erscheint dieses Ergebnis fragwürdig. Dies liegt wohl an der insgesamt geringen Anzahl an Folienproben (fehlende Balanciertheit). Um den hohen Einfluss des Bedruckstoffs auf den Glanz zu untermauern, wären weitere Versuche mit Folien als Bedruckstoff nötig. Die Pigmentkonzentration hat in diesem Fall einen größeren Einfluss auf den Glanz. Die 65 Proben mit den höchsten Glanzwerten sind Druckproben, die mit der niedrigsten Pigmentkonzentration gedruckt wurden. Die Pigmentart besitzt einen ähnlich großen Einfluss auf den Glanz wie der Tonwert. Die Effektpigmente der 2. Generation, das *Colorstream® Arctic Fire* und *Miraval® Scenic Copper* Pigment, das auch für einen hohen Glitzereffekt bekannt ist, erzeugen den größten Glanz. Das *Iriodin® Pigment 211 Rutil Feinrot* weist den geringsten Glanz auf, was auf die geringe mittlere Pigmentgröße (siehe Tabelle 3.1 und [29]) zurückzuführen ist. Es wird vorwiegend eingesetzt, um einen "seidenmatten" Glanz hervorzurufen.

Die Einflüsse auf die Homogenität der Druckproben sind in Abbildung 5.22 aufgezeigt. Bei hohen Schöpfvolumina sind die Druckproben am wolkigsten. Ein geringes Schöpfvolumen und eine hohe Druckgeschwindigkeit begünstigen die Homogenität der gedruckten Schichten. Dies kann ähnlich wie beim Glanz durch ein ungleichmäßiges Übereinanderliegen von Pigmenten erklärt werden. Durch das höhere Schöpfvolumen werden insgesamt höhere Schichtdicken gedruckt und mehr Pigmente übertragen, die in mehreren Schichten auch übereinander liegen können. Es steigt die Wahrscheinlichkeit, dass benachbarte gedruckte Schichten ungleichmäßig viele Pigmente enthalten und Agglomerationen entstehen. Diese werden im Druckbild besonders auf dunklem Untergrund, der die nicht an den Pigmenten reflektierten Lichtstrahlen absorbiert, als inhomogen empfunden. Da die Homogenität durch eine visuelle Abmusterung in nur drei Stufen eingeteilt wurde, wird von Aussagen über die Auswirkungen der anderen Einflussfaktoren abgesehen. Es ist jedoch anzumerken, dass visuell die Proben mit einem 70%igen Tonwert insgesamt dennoch am homogensten erscheinen. Dies wird durch die Bewertungsmethode teilweise relativiert, da sowohl die homogenen als auch die inhomogenen Bewertungsreferenzen für alle Tonwerte (50%, 70% und 100%) aus je einem Band eines Nutzens entnommen wurden. Die Proben mit schwarzem Unterdruck aus



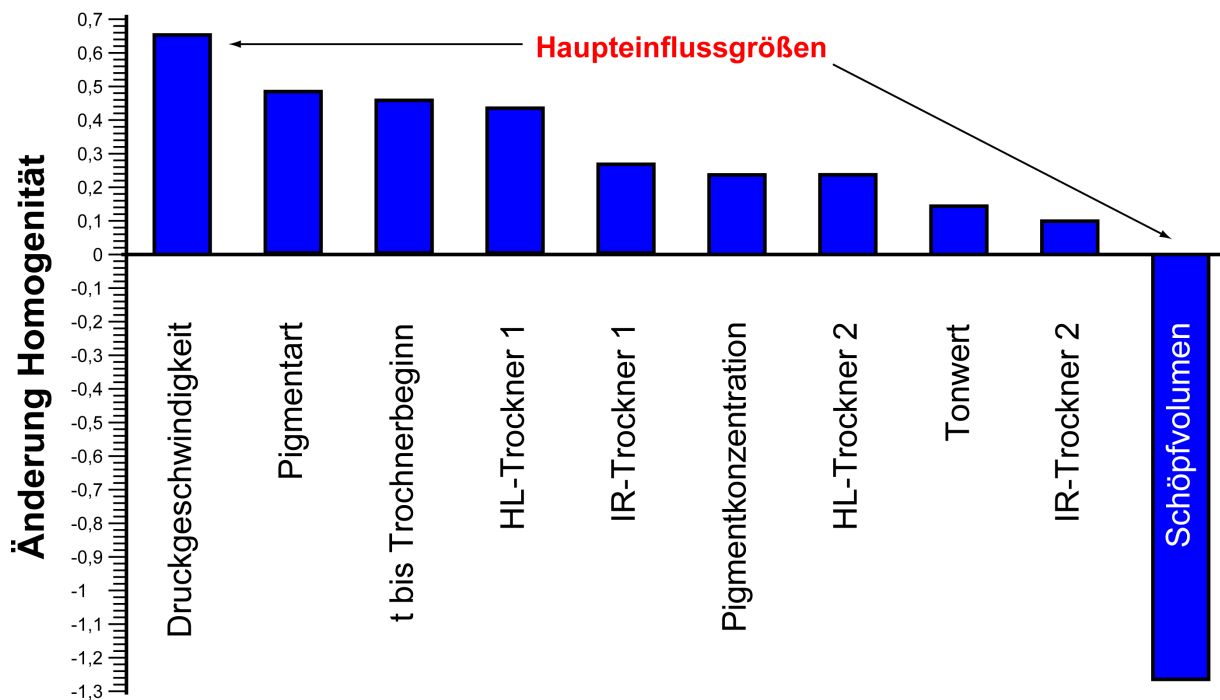


Abbildung 5.22: Einflüsse auf die Homogenität. Pareto-Diagramm der Einflussgrößen

Abbildung 5.6 wurden also dazu nicht voneinander getrennt. Abbildung 5.23 zeigt links die homogene Referenz (Druckversuch 18, Schöpfvolumen  $a \hat{=} 13 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^2}$ ) rechts die inhomogene Referenz (Druckversuch 40, Schöpfvolumen  $b \hat{=} 19 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^2}$ ).

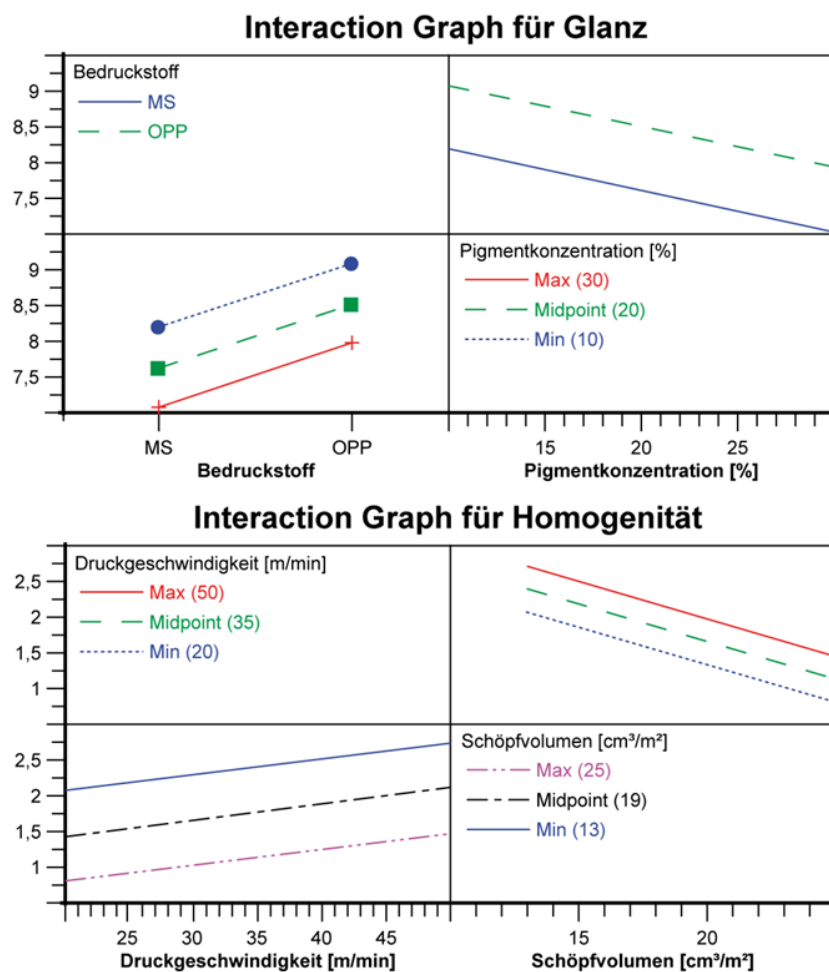
Es ist zu erkennen, dass der 70%ige Tonwert der inhomogenen Referenz bereits deutlich homogener erscheint als die beiden anderen derselben Referenz. Deshalb wird die Verwendung 70%iger Tonwerte beim Verdrucken von Effektpigmenten trotzdem empfohlen, um homogen gedruckte Effektpigmentschichten zu erhalten, auch wenn dies aus den eben genannten Gründen aus der Regression nicht abzuleiten ist. Nach dieser Bewertung weisen 19% der Druckproben eine gute, 36% eine akzeptable und 45% eine schlechte Homogenität der gedruckten Effektpigmentschicht auf. Die Bewertung erfolgt wie in Kapitel 3.2.3 erklärt bei Effektpigmentschichten, die auf Schwarz gedruckt wurden, wodurch die Inhomogenitäten besonders gut zu beobachten sind.

In Abbildung 5.24 sind die Einflüsse der Haupteinflussgrößen auf den Glanz und die Homogenität der Druckproben im Interaction Graph skizziert. Beim Glanz kann durch die betragsmäßig etwas größere Steigung der auf die Pigmentkonzentration bezogenen Geraden (links unten) und deren insgesamt größeren Abstand im Vergleich zu den beiden anderen (rechts oben), der größere Einfluss der Pigmentkonzentration auf den Glanz erkannt werden. Es wird außerdem ein geringerer Glanz mit steigender Pigmentkonzentration erwartet. Dies ist ebenfalls im Pareto-Diagramm aus Abbildung 5.21 erkennbar. Werden Pigmente der 2. Generation (*Colorstream<sup>®</sup> Arctic Fire* und *Miraval<sup>®</sup> Scenic Copper*) mit der geringsten Pigmentkon-

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG



**Abbildung 5.23:** Visuelle Bewertung der Homogenität der Druckproben aus den Versuchen nach statistischer Versuchsplanung. Links ist die homogene, rechts die inhomogene Referenz abgebildet. In der Mitte werden die Felder mit schwarzem Unterdruck mit denen der Referenzproben verglichen.



**Abbildung 5.24:** Darstellung der Beeinflussung von Glanz und Homogenität durch deren Haupteinflussfaktoren im Interaction Graph (erstellt mit *Cornerstone<sup>TM</sup>*)

zentration auf Folie gedruckt, so wird laut Modell der größte Glanz erreicht. Bezüglich der Homogenität ist ein positiver Effekt bei steigender Druckgeschwindigkeit und sinkendem Schöpfvolumen zu beobachten. Die betragsmäßig größere Steigung der Geraden im rechten oberen Kästchen im “Interaction Graph für Homogenität” in Abbildung 5.24 zeigt, wie die größeren Abstände der Geraden im linken unteren Kästchen, den höheren Einfluss des Schöpfvolumens auf die Homogenität der Effektpigmentschichten.

### 5.4.5 Kostenbetrachtung

Bei der Herstellung von Produkten sind, um diese marktfähig zu machen, neben deren Qualität ebenfalls die Kosten von Interesse. Eines der in Kapitel 2.4 formulierten Ziele dieser Arbeit ist, die Qualität von Effektpigmentdruckprodukten bei bestenfalls geringeren Kosten zu steigern. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Kosten der gedruckten Effektpigmentschichten betrachtet.

Als Datengrundlage dienen die durchgeführten Versuche. Da eine vollständige Kostenrechnung beliebig durch die Einbeziehung von Maschinenkosten, Energiekosten (u.a. aufgrund unterschiedlicher Trockner-einstellungen), Personalkosten usw. in die Tiefe geht und sich dadurch je nach Standort und Randbedin-gungen verändern kann, werden nur die Materialkosten betrachtet. Zur Aufstellung einer Kostenrechnung werden folgende Annahmen getroffen:

- Die in Gewichtsprozent angegebenen Pigmentanteile sind vollständig und gleichmäßig im Lack ver-teilt und gelangen in derselben Konzentration auf den Bedruckstoff.
- Die einzelnen Bänder der Rasterwalze geben bei der Farbübertragung 35% ihres theoretischen Schöpfvolumens an die Flexodruckform ab.
- Von der Flexodruckform erfolgt ein 50 %iger Farbübertrag auf den Bedruckstoff, der mengenmäßig der Hälfte der Prozentzahl des theoretischen Tonwerts entspricht.

Es steht außer Frage, dass dadurch ein Fehlerpotenzial für die Kostenrechnung gegeben ist. Die 35 %ige Farbübertragung entspricht einerseits den Erfahrungen eines Rasterwalzenherstellers und ist andererseits sicherlich nicht unabhängig von den restlichen Einflussgrößen, wie z.B. der Geschwindigkeit oder der Pig-mentkonzentration. Weder korreliert der Tonwert der Druckform exakt mit der übertragenen Farbmenge, noch erfolgt bei der Farbspaltung immer ein 50 %iger Farbübertrag auf den Bedruckstoff. Ohne Annah-men wäre jedoch eine einfache Materialkostenberechnung nicht durchführbar.

Aus den auf einen Quadratmeter Druckfläche bezogenen Preisen der Substrate ( $P_S$ ), Pigmente ( $P_P$ ) und des Lacks ( $P_L$ ) und deren technischen Daten werden somit für jede Druckprobe nach Gleichung 5.14 die Quadratmeterkosten ( $P$ ) berechnet. Diese setzen sich aus den Kosten des Substrats ( $P_S$ ) und der Effektpigmentfarbe ( $P_F$ ) zusammen.  $\tilde{p}_S$  ist der Kilopreis des Substrats,  $g_S$  dessen Grammatur in  $[\frac{g}{m^2}]$ ,  $v_{th}$  das theoretische Schöpfvolumen der Rasterwalze,  $T$  der theoretische Tonwert der Druckform in [%],

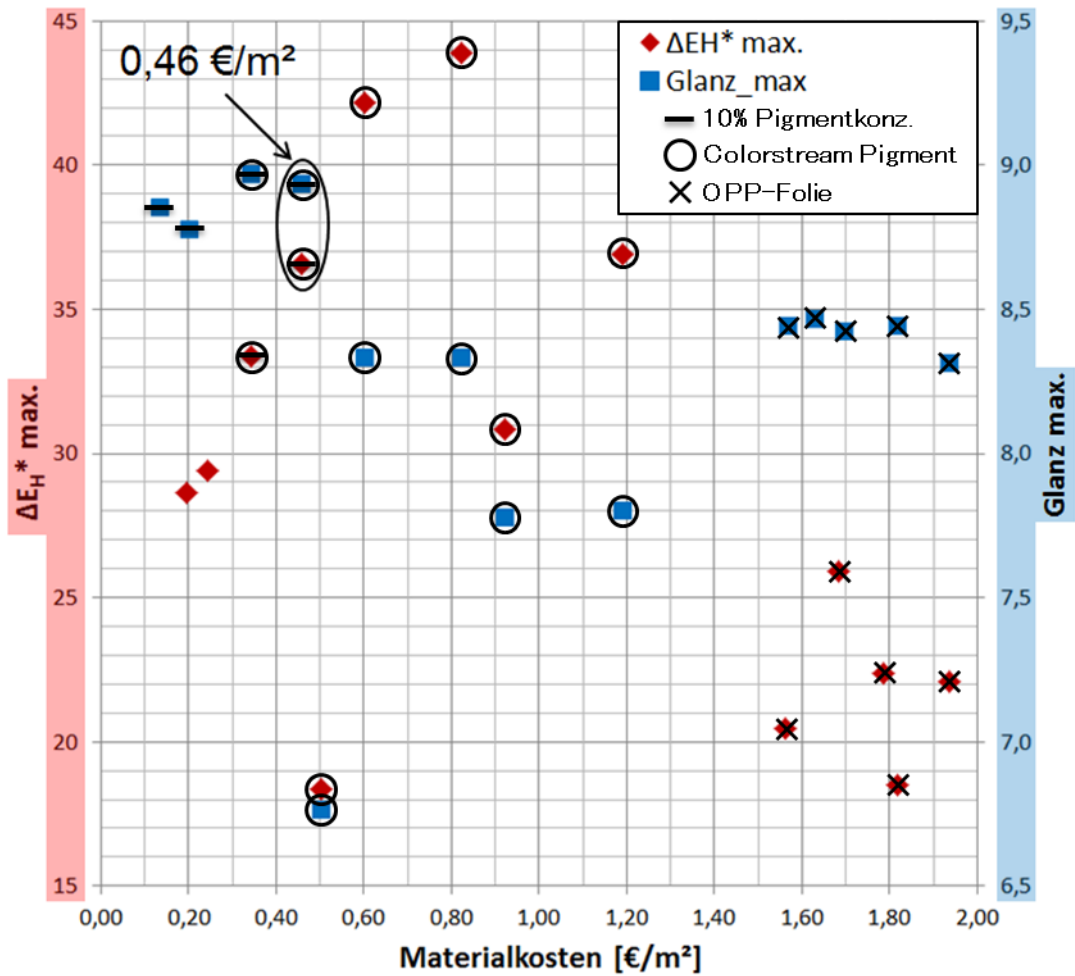
## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

$\tilde{p}_P$  der Kilopreis des Pigments,  $\rho_P$  die mittlere Pigmentdichte,  $c_P$  die Pigmentkonzentration in [Gew.-%] und  $\tilde{p}_L$  der Kilopreis des Lacks. Eine Auflistung der entsprechenden Werte befindet sich im Anhang A (Tabelle A.1) und in Abbildung 5.6.

$$\begin{aligned}
 P &= P_S + P_F = \\
 &= P_S + (P_P + P_L) = \\
 &= \frac{1}{1000} \left\{ \tilde{p}_S \cdot g_S + 0,35 \cdot 0,5 \cdot v_{th} \cdot \frac{T}{100} \left[ \tilde{p}_P \cdot \rho_P \cdot \frac{c_P}{100} + \tilde{p}_L \left( 1 - \frac{c_P}{100} \right) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

Nach Gleichung 5.14 wird jeder Probe ein Quadratmeterpreis zugeordnet, der ausschließlich die Materialkosten umfasst. Neben dem Color-Shift, dem Glanz und der Homogenität stellt dieser das vierte Qualitätsmerkmal der Effektpigmentproben dar. Um eine übersichtliche Visualisierung der Kosten der einzelnen Materialkombinationen zu erhalten, wird die in Abbildung 5.25 gezeigte Darstellung gewählt. Dazu werden alle Proben aufsteigend nach ihren Materialkosten geordnet und diejenigen innerhalb jedes 10-Cent-Intervalls ausgewählt, die den größten Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Wert,  $\diamond$  rot) und Glanz ( $\square$  blau) besitzen. Diese Punkte sind in Abbildung 5.25 eingezeichnet. Die beiden Ordinaten sind dabei unabhängig voneinander positioniert. Es wurde lediglich darauf geachtet, dass alle maximalen Color-Shift- und Glanzwerte dargestellt werden können. Das bedeutet, dass sich innerhalb jedes 10-Cent-Intervalls entweder zwei Punkte, einer für den maximalen Color-Shift und der andere für den maximalen Glanz, oder kein Punkt befindet. Letzterer Fall tritt auf, wenn die nach Gleichung 5.14 berechneten Quadratmeterkosten für keine Probe innerhalb eines 10-Cent-Intervalls liegen (z.B. bei 1,40 – 1,50 €/m<sup>2</sup>). Ebenfalls ist es möglich, dass dieselbe Druckprobe innerhalb eines Intervalls sowohl den maximalen Color-Shift als auch den maximalen Glanz besitzt, wie es beispielsweise bei den beiden hervorgehobenen Punkten der Fall ist. Diese Probe besitzt im Preisbereich zwischen 0,40 und 0,50 €/m<sup>2</sup> bei einem Quadratmeterpreis von  $P = 0,46$  €/m<sup>2</sup> einen  $\Delta E_H^*$ -Wert von 36,65 und einen Glanzwert von 8,93. Die Homogenität der Druckproben wird dabei nicht berücksichtigt. Zusätzlich sind aus allen eingezeichneten Punkten diejenigen markiert, die mit *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmenten ( $\circ$ ), einer Pigmentkonzentration von 10 % (–) und auf OPP-Folie ( $\times$ ) gedruckt wurden. Dadurch werden weitere Tendenzen dieser Einflussgrößen bezüglich einer Maximierung der Zielgrößen Color-Shift und Glanz erkennbar. Bei der oben genannten Probe wurde demnach mit einer 10%igen *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmentfarbe auf Papier gedruckt. Wie aus Abbildung 5.25 ersichtlich, haben hauptsächlich die mit *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmenten bedruckten Proben den größten Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte). Die Proben der vier höchsten gemessenen Glanzwerte befinden sich bei Preisen unter 0,50 €/m<sup>2</sup> und weisen die niedrigste Pigmentkonzentration (10 %) auf. Von den Druckproben, deren Materialpreise 1,50 €/m<sup>2</sup> überschreiten, wurden alle auf OPP-Folie gedruckt. Da



**Abbildung 5.25:** Materialkosten in €/m<sup>2</sup>. Aufgetragen sind der Color-Shift und Glanz über die Materialkosten. Jeder hergestellten Probe ist ein  $\Delta E_H^*$ - und Glanzwert sowie ein Quadratmeterpreis zugeordnet. Aus den aufsteigend nach den Materialkosten geordneten Proben sind innerhalb jedes 10-Cent-Intervalls diejenigen aus allen Proben (495) eingezeichnet, die den größten Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Wert) und Glanz besitzen. Innerhalb jedes 10-Cent-Intervalls befinden sich somit maximal zwei Werte, einer für den Color-Shift und einer für den Glanz. Zusätzlich sind aus diesen diejenigen markiert, die mit *Colorstream*<sup>®</sup> Arctic Fire Pigmenten, einer Pigmentkonzentration von 10% und auf OPP-Folie gedruckt wurden.

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

der Folienpreis (49,30 €/kg) den Papierpreis (0,88 €/kg) deutlich übersteigt befinden sich keine Papierproben in diesem Preissegment. Dies fällt umso mehr ins Gewicht, da sich die Pigmentpreise im Gegensatz zu den Bedruckstoffpreisen deutlich verringert haben. Kosteten die *Colorstream*<sup>®</sup> Pigmente *T 10-02 Arctic Fire* im Jahre 2008 noch 462 €/kg, so lag der Preis im Jahre 2011 bei 323 €/kg, was einer Preissenkung von 30% entspricht. Im Vergleich zu konventionellen Druckfarben und dem Lack, der hier 2,60 €/l kostete, bleiben die Pigmentpreise jedoch weiterhin sehr hoch [8]. Das wird deutlich, wenn unterschiedliche gedruckte Farbmengen betrachtet werden. Eine Verdoppelung der übertragenen Farbmenge der markierten Probe bewirkt ein ansteigen des Quadratmeterpreises  $P$  von 0,46 auf 0,83 €/m<sup>2</sup>.

Insgesamt ist aus der Darstellung ersichtlich, dass es für den Drucker möglich ist, trotz niedriger Kosten hohe Effektwirkungen zu erzielen. Dieser Zusammenhang war bisher nicht bekannt. Es kann somit eine Materialkombination gewählt werden, die den Kundenwünschen bezüglich der Qualitätsmerkmale Color-Shift, Glanz und Materialkosten möglichst gut entspricht.

### 5.5 Diskussion der Ergebnisse

Rückblickend auf die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieses Kapitels erfolgt in den sich anschließenden Abschnitten eine kritische Diskussion der Ergebnisse, die eine genauere Betrachtung der durchgeführten Screening-Versuchsreihe, die Auswirkungen der inhomogenen Ausdrücke und Empfehlungen für den Anwender enthält.

#### 5.5.1 Folgerungen aus der Screening-Versuchsreihe

Die Art der durchgeführten Versuchsreihe entspricht einem Screening-Versuch. Diese werden eingesetzt, wenn erst wenig über eine Problemstellung bekannt ist und viele Faktoren untersucht werden sollen [112]. Obwohl im hier vorliegenden Fall schon viele Erkenntnisse aus Vorversuchen (siehe Kapitel 4) gewonnen werden konnten, wurde dieser Versuchstyp gewählt, um im Besonderen die Trocknungseinstellungen detailliert untersuchen zu können. Letztere erwiesen sich jedoch nicht als Haupteinflussfaktoren der betrachteten Zielgrößen. Lediglich die “Zeit bis Trocknerbeginn” wird in Kapitel 6 genauer betrachtet, da diese als größter verfahrenstechnischer Einflussparameter einen Hebel für eine für Effektpigmente optimierte Maschinenkonfiguration vermuten lässt.

Eine gängige Vorgehensweise wäre, für die aus einem Screening-Versuch gefundenen Haupteinflussgrößen einen weiteren Versuchsplan aufzustellen, der Wechselwirkungen der Faktoren und quadratische Effekte einbezieht. Eine Versuchsplanung für ein quadratisches Regressionsmodell mit Wechselwirkungen empfiehlt für die vier größten Einflussfaktoren (Pigmentart, Schöpfvolumen, Tonwert und Zeit bis

**Tabelle 5.2:** Gegenüberstellung der Gütemaße verschiedener Regressionsmodelle bezüglich des Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) bei Zugriff auf dieselben Versuchsdaten (EG=Einflussgrößen)

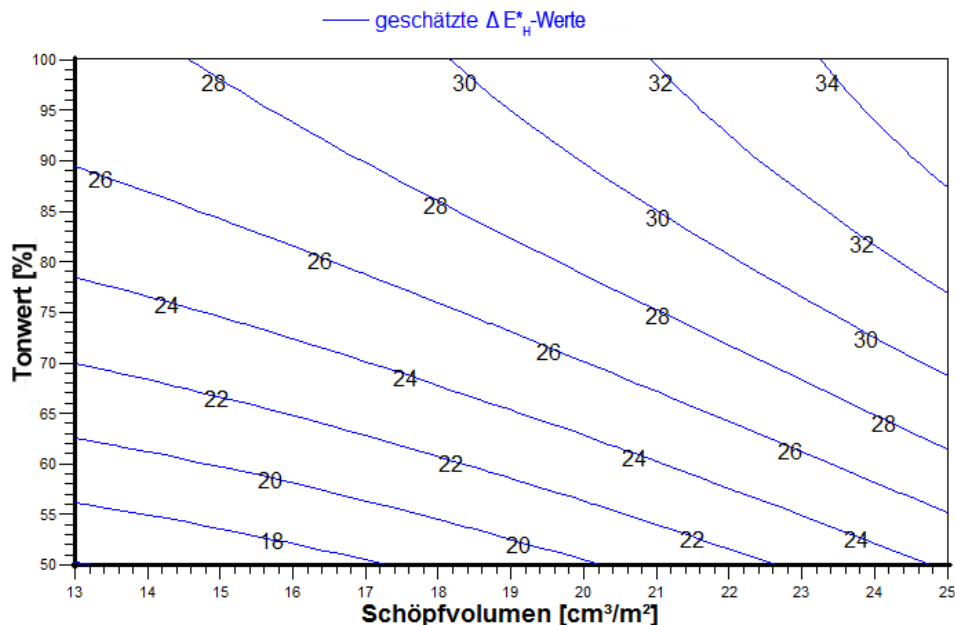
Zielgröße: Color-Shift	$R^2$	adj. $R^2$	RMS-Error
lineare Regression (alle Faktoren)	0,85	0,84	3,22
lineare Regression mit Wechselwirkungen (4 EG)	0,77	0,77	3,95
quadratische Regression mit Wechselwirkungen (4 EG)	0,78	0,78	3,87

Trocknerbeginn) bezüglich des Color-Shift (siehe Abbildung 5.18) die Durchführung 27 verschiedener Versuchseinstellungen. Es handelt sich dabei wiederum um einen D-optimalen Versuchsplan, da durch die Verwendung einer diskreten Größe (Pigmentart) außer einem vollfaktoriellen Versuchsplan kein anderer realisierbar ist. Weil die Durchführung und Auswertung solcher Versuche nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden konnte, wird auf die vorhandenen Daten zurückgegriffen.

Da 459 der 495 Proben bei unterschiedlichen Versuchseinstellungen gedruckt wurden, was die in Tabelle 5.1 empfohlene Probenzahl der Anwendersicht (19) um ein 24-faches übersteigt, genügen die vorhandenen Daten ebenfalls, um daraus ein quadratisches Regressionsmodell zu bilden, das die Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen berücksichtigt. Alle Versuche können in einen D-optimalen Versuchsplan, wie in Kapitel 5.2.8 erwähnt, nachträglich eingefügt werden. Dadurch wird jedoch folgender Fehler begangen: Da in einem neu durchgeführten Regressionsmodell nur die aufgezählten Faktoren betrachtet werden, bleiben die Änderungen, die durch die außer Acht gelassenen Faktoren entstanden sind, unberücksichtigt und werden somit als statistischer Fehler betrachtet. Das heißt, dass ein aus den Daten der genannten Faktoren gebildetes quadratisches Regressionsmodell versucht, die Werte der Zielgröße (Color-Shift) nur durch vier Einflussfaktoren zu erklären.

In Tabelle 5.2 sind die Gütemaße einer neu gebildeten linearen Regression mit Wechselwirkungen und einer quadratischen Regression mit Wechselwirkungen der ursprünglichen gegenübergestellt. Dabei werden nur die Wechselwirkungen und quadratischen Effekte berücksichtigt, deren Irrtumswahrscheinlichkeiten (p-Wert) kleiner als 0,10 sind (siehe Abbildungen B.2 und B.3 im Anhang B). Dabei ist zu erkennen, dass die Bestimmtheitsmaße und der RMS-Error der mit den alten Daten neu gebildeten Regressionsmodelle ungefähr 10 % bzw. 17 – 18 % schlechter sind als die des ursprünglichen linearen Regressionsmodells. Das quadratische Regressionsmodell schneidet dabei leicht besser ab als das lineare Modell mit Wechselwirkungen. Der aus der quadratischen Regression für das *Colorstream® Arctic Fire* Pigment in Abbildung 5.26 gezeigte Contour-Plot unterscheidet sich dennoch merklich von dem in Abbildung 5.20. Berührt die Trajektorie des  $\Delta E_H^*$ -Werts 22 einmal die Abszisse bei "Schöpfungsvolumen" 15,5, so geschieht dies in Abbildung 5.26 bei ca. 22,5. Dieser relativ große Unterschied ist auf die nicht berücksichtigten Einflussfaktoren

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG



**Abbildung 5.26:** Darstellung der Beeinflussung des Color-Shift bei gedruckten *Colorstream® Arctic Fire* Pigmenten in einem vollständig quadratischen Regressionsmodell

beim quadratischen Modell zurückzuführen.

Die Umsetzung eines quadratischen Versuchsplans aus den genannten Einflussfaktoren mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen hätte Potential, das bisherige lineare Regressionsmodell zu verbessern, da sich die Auswirkungen der anderen Faktoren dabei nicht in den Werten der Zielgröße widerspiegeln und damit nicht als statistischer Fehler betrachtet werden würden.

So hilfreich die statistische Versuchsplanung bei der Untersuchung technischer Prozesse auch sein mag, so schwierig ist es oftmals, die geplanten Versuche in die Realität umzusetzen. Dabei ist es problematisch, eine gewisse Übereinstimmung der Sichten der Versuchsdurchführung und -auswertung (siehe Tabelle 5.1) und der damit verbundenen einschränkenden Randbedingungen zu erhalten. Diese Problematik entsteht bei *Cornerstone™* bei der Definition der Einflussgrößen und der einschränkenden Bedingungen, die für Optimierungen benötigt werden. Stehen bei der Versuchsplanung mehrere Stufen einer kontinuierlichen Einflussgröße fest, so muss zu deren Implementierung oftmals der Umweg über eine diskrete Größe gegangen werden, was die empfohlene Anzahl der durchzuführenden Versuche verändert. Wurden die Versuche durchgeführt und die Ergebnisse durch das Einlesen einer Excel-Tabelle in *Cornerstone™* übertragen, so werden automatisch alle mit Zahlen belegten Größen als kontinuierliche behandelt. Da damit keine direkte Verbindung zur Versuchsplanung besteht, werden die einschränkenden Bedingungen nicht übernommen. Dadurch werden bei einer Optimierung der Zielgrößen Einstellungen empfohlen, die in der Realität nicht umsetzbar sind, z.B. Anzahl der eingeschalteten IR-Strahler beim IR-Trockner 1: 0,83).



Aus diesem Grund und weil, wie oben erwähnt, keine weiteren Versuchsreihen durchgeführt wurden, wird von einem Druckversuch mit optimalen Versuchseinstellungen zur Validierung der Regressionsmodelle abgesehen. Die erhaltenen Ergebnisse sind als qualitativ zu betrachten und werden in Kapitel 5.5.3 als Empfehlungen für den Anwender zusammengefasst. Bei der statistischen Versuchsplanung ist es ebenfalls nicht einfach, spontane Veränderungen bei der Versuchsdurchführung in die Auswertung einzubeziehen. Dies geschieht beispielsweise, wenn der Drucker durch seine Erfahrung Maschinenparameter während der Versuchsdurchführung verändert, die nicht als Einflussgrößen berücksichtigt werden, und somit Einfluss auf die Zielgrößen nimmt. Bei der durchgeführten Versuchsreihe erfolgte in zwei der 51 Versuchseinstellungen ein Wechsel von OPP-Folie auf Papier, da bei der Folie keine Trocknung der Pigmentschicht erreicht werden konnte. Dies verringerte die ohnehin schon geringen Foliendruckproben und hatte damit negative Auswirkungen auf die Signifikanz des Bedruckstoffs im Modell. Je nach Wissensstand über die zu untersuchenden Prozesse wird empfohlen, die statistische Versuchsplanung diesem anzupassen und so weit wie möglich iterative Änderungen des Versuchsplans zuzulassen.

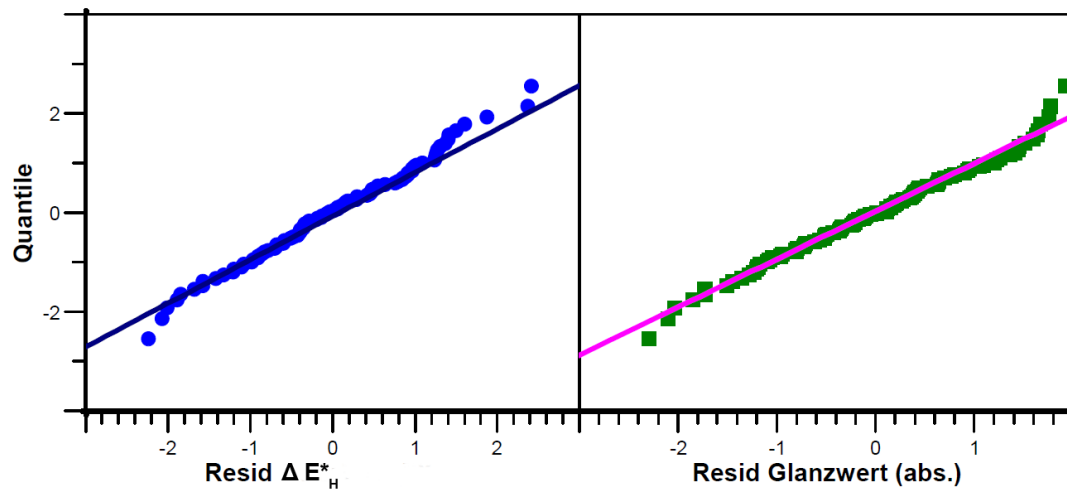
### 5.5.2 Streuung durch Inhomogenität

Um den Einfluss der Inhomogenität der Druckproben auf die Messung von Color-Shift und Glanz zu überprüfen, werden aus allen Druckproben diejenigen entfernt, die die höchste Inhomogenität (Bewertungsnote: 1) aufweisen. Es verbleiben 274 Druckproben. In einem zweiten Schritt werden nur die Druckproben mit der höchsten Homogenität (Bewertungsnote: 3, Anzahl 92) betrachtet. Aus den verbleibenden Datensätzen wird jeweils eine lineare Regression für die Zielgrößen Color-Shift ( $\Delta E_H^*$ -Werte) und Glanz gebildet, deren Gütemaße in Tabelle 5.3 gegenübergestellt sind. Bei allen Regressionen bezogen auf den Glanz wird wie bisher der Faktor “t bis Trocknerbeginn” nicht betrachtet. Es ist ersichtlich, dass sich die Gütemaße der linearen Regressionsmodelle für den Color-Shift stetig verbessern, umso mehr ausschließlich homogene Druckproben betrachtet werden. Das bedeutet, dass sich die Güte der Regression trotz stark sinkender Anzahl an betrachteten Druckproben verbessert. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für den Color-Shift wächst von 0,85 auf 0,91, während der RMS-Error von  $\Delta E_H^* = 3,22$  auf 2,52 sinkt. Die Voraussetzung dafür ist im “Residuals Probability Plot” der linearen Regression der homogensten Druckproben in Abbildung 5.27 ersichtlich. Die Punkte folgen sehr gut den Geraden, wodurch eine Normalverteilung der Residuen erfüllt ist. Im Vergleich zu den Residuen in Abbildung 5.14 liegen sie hier in einem Bereich von  $\pm 2,5$  Standardabweichungen.

Beim Glanz verbessern sich die Gütemaße hingegen so gut wie gar nicht, was bedeutet, dass die Glanzmessung mit dem *Vipgloss-1* Messgerät unabhängig von der Homogenität der gedruckten Schichten erfolgen kann.

Zusammenfassend folgt daraus, dass eine Verbesserung der Homogenität der gedruckten Schichten eine

## 5. ERUIERUNG DER HAUPTINFLUSSFAKTOREN MITHILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG



**Abbildung 5.27:** Residuals Probability Plot für Color-Shift und Glanz aus den homogensten Druckproben ohne Ausreißer: Eine sehr gute Annäherung an die Gerade der Normalverteilung der Residuen ist ersichtlich.

**Tabelle 5.3:** Gegenüberstellung der Gütemaße verschiedener Regressionsmodelle in Abhängigkeit der Homogenität der Druckproben

Gütemaße je nach Homogenität	Zielgröße	$R^2$	adj. $R^2$	RMS-Error
lineare Regression	$\Delta E_H^*$ -Werte	0,85	0,84	3,22
	Glanzwerte	0,88	0,88	0,24
lineare Regression ohne inhomogene Druckproben	$\Delta E_H^*$ -Werte	0,88	0,87	2,63
	Glanzwerte	0,88	0,87	0,23
lineare Regression der homogensten Druckproben	$\Delta E_H^*$ -Werte	0,91	0,89	2,52
	Glanzwerte	0,88	0,86	0,21

Voraussetzung für eine Modelloptimierung bezüglich des Color-Shift darstellt. Die in Kapitel 4.3 getroffene Aussage, dass Halbtonflächen (50% und 70%) im Gegensatz zu Volltonflächen (100%) homogenere Schichten liefern und somit die Druckqualität verbessern, kann dadurch nur bedingt bestätigt werden. Da sich unter den homogensten Druckproben 20 mit 50%, 41 mit 70% und 31 mit 100% Rasterung befinden, haben immerhin 66% der homogensten Druckproben keine vollflächig gedruckten Schichten.

### 5.5.3 Empfehlungen für den Anwender

Abschließend werden die Ergebnisse dieses Kapitels in Form von Anwendungsempfehlungen für das Verdrucken von Effektpigmentfarben zusammengefasst:

- Um die optischen Effekte (Color-Shift und Glanz) der Effektpigmentfarben möglichst gut wiederzugeben, wird empfohlen Schwarz oder eine dunkle Farbe vorzudrucken. Bei transparenten Folien ist dazu ein Rückseitendruck ebenfalls möglich, wenngleich ein vorderseitiger Unterdruck aufgrund der besseren optischen Effekte bevorzugt werden sollte. Bei dem Unterdruck ist auf die Haftung der aufzudruckenden Effektpigmentfarbe zu achten (geeignete Unterdruckfarbe bzw. Lack zum Einmischen der Effektpigmente verwenden).
- Inhomogene Flächen sind auf Schwarz visuell sehr deutlich zu sehen. Diese gilt es demnach möglichst zu vermeiden. Eine gute Homogenität der gedruckten Schichten wird durch hohe Druckgeschwindigkeiten, geringe Schöpfvolumina und Tonwerte mit einer autotypischen Rasterung um die 70% erreicht.
- Wird ein großer Color-Shift gewünscht, so sollte auf hochwertige Effektpigmente der 2. Generation (z.B. *Colorstream*<sup>®</sup>-Serie von *Merck*, *Lumina*<sup>®</sup>-Serien von *BASF* oder ähnliche) zurückgegriffen werden. Die höheren Kosten im Vergleich zu billigeren Pigmenten lassen sich durch geringere Pigmentkonzentrationen und Schöpfvolumina weitgehend kompensieren.
- Um einen hohen Glanz zu erreichen, sollte auf jeden Fall der Bedruckstoff beziehungsweise die untergedruckte Schicht berücksichtigt werden. Je stärker diese ohne aufgedruckte Effektpigmentschicht glänzen, desto höherer Glanz wird auch nach dem Verdrucken erwartet. Glänzend gestrichene Papiere oder Folien eignen sich besonders für einen hohen Glanzeffekt. Des Weiteren ist darauf zu achten, nicht zu hohe Pigmentkonzentrationen zu verwenden, da gezeigt wurde, dass diese den Glanz negativ beeinflussen. Ebenfalls ist die Verwendung von Pigmenten sinnvoll, die für hohe Glanzeffekte entwickelt wurden, sowie eine Überlackierung mit einem Glanzlack.
- Generell ist es am wichtigsten, die Pigmente entsprechend den Kundenwünschen zu wählen. Damit der Kunde seine Entscheidung für eine bestimmte Pigmentart und für den Bedruckstoff leichter fällen kann, wird empfohlen, eine Druckform mit unterschiedlichen Tonwerten zu erstellen und mit

## 5. ERUIERUNG DER HAUPT EINFLUSSFAKTOREN MIT HILFE DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG

---

dieser verschiedene Pigmentarten auf die gängigsten Bedruckstoffe zu verdrucken. Die Druckproben können danach katalogisiert den potenziellen Kunden präsentiert werden.

- Zur Kontrolle des Glanzes kann ein handelsübliches Glanzmessgerät (z.B. das *micro-gloss* von *BYK-Gardener*) verwendet werden. Diese Handgeräte haben jedoch durchaus hohe Anschaffungskosten ( $> 1500 \text{ €}$ ).
- Zur Messung des Color-Shift wird die Verwendung eines Mehrwinkelspektrofotometers empfohlen. Diese besitzen jedoch den Nachteil, dass sie einerseits weitaus teurer sind als die Glanzmessgeräte (ca. 25.000 €) und andererseits keine direkte Ausgabemöglichkeit des nach Gleichung 3.1 berechneten  $\Delta E_H^*$ -Werts besitzen. Für Anwender wird daher empfohlen, nach der Erstellung eines Katalogs mit unterschiedlichen Effektpigmentproben, diese durch die Angabe der Messwerte des Color-Shift (und Glanz) zu ergänzen. Dazu kann das Messgerät kurzzeitig ausgeliehen werden.

Aus den Ergebnissen leitet sich die weitere Vorgehensweise für diese Arbeit ab. Dabei wird das Ziel verfolgt, zu untersuchen, in wieweit durch den Einsatz eines kamerabasierten Druckinspektionssystems die Trocknungsphase der gedruckten Schichten detektierbar ist, ob damit eine Umorientierung der Pigmente nach dem Druckspalt nachgewiesen werden kann und eine Prozesskontrolle möglich ist.

## 6

# Kamerabasierte Messung von gedruckten Effektpigmenten

Die Trocknungseinstellungen erwiesen sich bei den Untersuchungen in Kapitel 5 bei keinem Qualitätsmerkmal als ein Haupteinflussfaktor. Die “Zeit bis Trocknerbeginn” besitzt laut Abbildung 5.18 dennoch den größten negativen Einfluss auf den Color-Shift. Es wird daher vermutet, dass während der Trocknungsphase eine Umorientierung der Effektpigmente im Lack erfolgt, wodurch sich die  $\Delta E_H^*$ -Werte verändern. Diese Erkenntnis stimmt mit den Aussagen in [84] bei Lackschichten (Schichtdicken  $> 100 \mu m$ ) überein. Deren Gültigkeit für gedruckte Schichten wurde jedoch noch nicht überprüft. Ein Ziel dieses Kapitels ist es deshalb, eine mögliche Umorientierung der Pigmente während der Trocknungsphase nachzuweisen. Beeinflusst die Trocknungszeit oder die Maschinengeschwindigkeit die Orientierung der Pigmente und damit den Color-Shift, so gilt es dies in der Praxis bei der Maschinenkonfiguration zu berücksichtigen. Zur Untersuchung wird ein am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren vorhandener Prüfstand umgebaut, der verwendet wurde, um Farbdichtemessungen druckfrischer Offsetfarben während der Trocknungsphase mit einem kamerabasierten Druckinspektionssystem vorzunehmen [38]. Eine detaillierte Erklärung des übernommenen Prüfstandes befindet sich in [38]. Der Versuchsaufbau ist nachfolgend beschrieben.

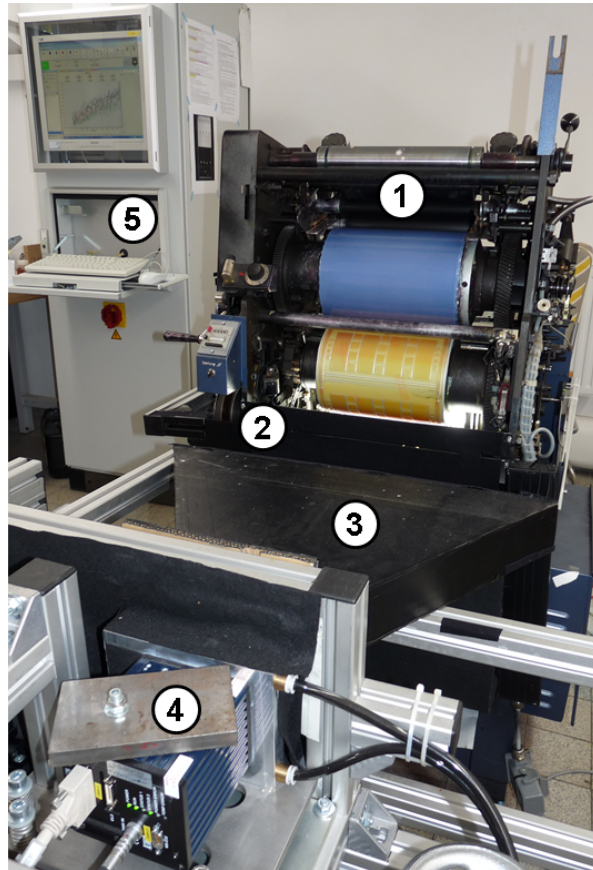
### 6.1 Aufbau des Versuchsstandes

Für die Herstellung und Inline-Messung der in diesem Kapitel betrachteten Druckproben wird der in den Abbildungen 6.1 und 6.2 dargestellte Prüfstand verwendet. Die Hauptkomponenten des Prüfstandes sind eine Bogenoffsetdruckmaschine und ein Druckinspektionssystem. Letzteres besteht aus einer Kamera, einer Beleuchtung und einem Rechner. Die Hauptaufgaben eines Druckinspektionssystems liegen bei der Kontrolle und Dokumentation der Qualität des Bedruckstoffs und des Druckbildes bei Druckgeschwin-

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

---

digkeiten bis zu  $5 \frac{m}{s}$ . Dabei können Druckfehler aus den Abweichungen der aufgenommenen Bilder im Vergleich zu einem fehlerfreien Referenzbild erkannt werden.

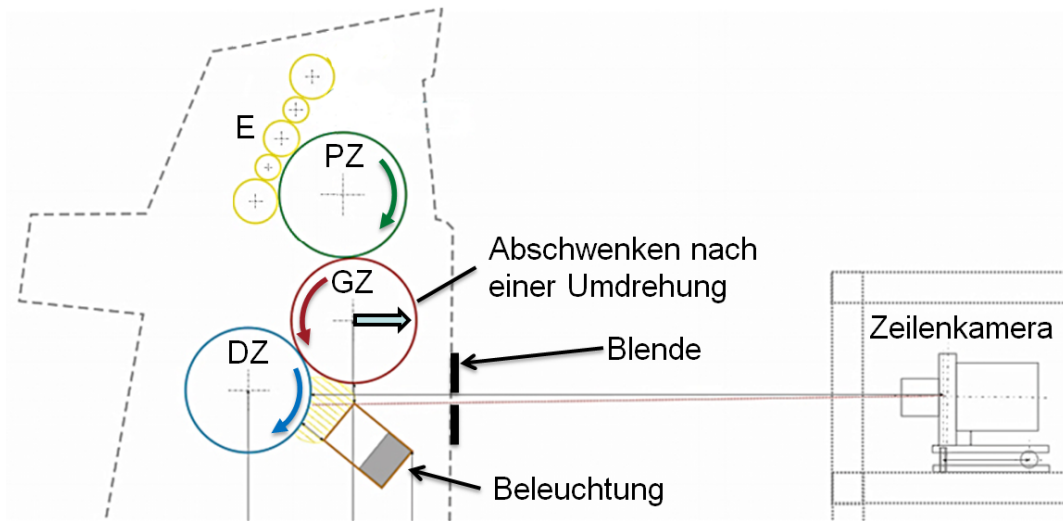


**Abbildung 6.1:** Von Pawlowski [38] übernommener angepasster Versuchsstand:

- 1: Bogenoffsetdruckmaschine, die für den Flexodruck umgebaut wurde. Auf dem Plattenzylinder ist eine vollflächige Offsetdruckform (Zylinder oben, blau), auf dem Gummituchzylinder die Flexodruckform (Zylinder unten, orange) erkennbar.
- 2: Blende zur Vermeidung der Detektion direkter Oberflächenreflexionen an der gedruckten Schicht
- 3: Streulichtblende zur Reduzierung von Streulichteinflüssen aus der Umgebung
- 4: Zeilenkamera *XIIMUS*, deren Temperatur durch eine Durchlaufkühlung konstant gehalten wird ( $20^{\circ}C$ )
- 5: Rechner des Druckinspektionssystems

Zur Umrüstung von Offset auf das Flexodruckverfahren wurden bei der Druckmaschine folgende Maßnahmen umgesetzt (siehe Abbildung 6.2):

- Das Feuchtwerk der Bogenoffsetmaschine wurde entfernt. Eine Einfärbung der Walzen (E) mit der im Vergleich zur Offsetfarbe niederviskosen Flexodruckfarbe erfolgt durch Aufspachteln auf die oberste Einfärbewalze durch den Bediener.
- Auf den Plattenzylinder (PZ), auf dem im Offsetdruckverfahren die bildgebende Druckform aufgespannt ist, wird eine unbelichtete Offsetplatte aufgebracht, die eine vollflächige Farbübertragung



**Abbildung 6.2:** Prüfstand zur Herstellung und Inline-Vermessung von Effektpigmentproben ([38] geändert).

Die Zylinder der Bogenoffsetdruckmaschine *Rotaprint R40* wurden an das Flexodruckverfahren angepasst.

Einfärbung (E): nur Farbwerk (Das im Offsetdruck notwendige Feuchtwerk wurde entfernt.)

Plattenzylinder (PZ): unbelichtete Offsetplatte (statt Rasterwalze im Flexodruck)

Gummituchzylinder (GZ): Flexodruckform

Druckzylinder (DZ): aufgeklebter Bedruckstoff

Die Beleuchtung mit einer Leuchtstoffröhre erfolgt im  $45^\circ$  Winkel zum Detektionswinkel der Kamera.

wasserbasierter Flexodruckfarben erlaubt. Sie dient anstelle einer Rasterwalze zur Farbübertragung auf die Druckform.

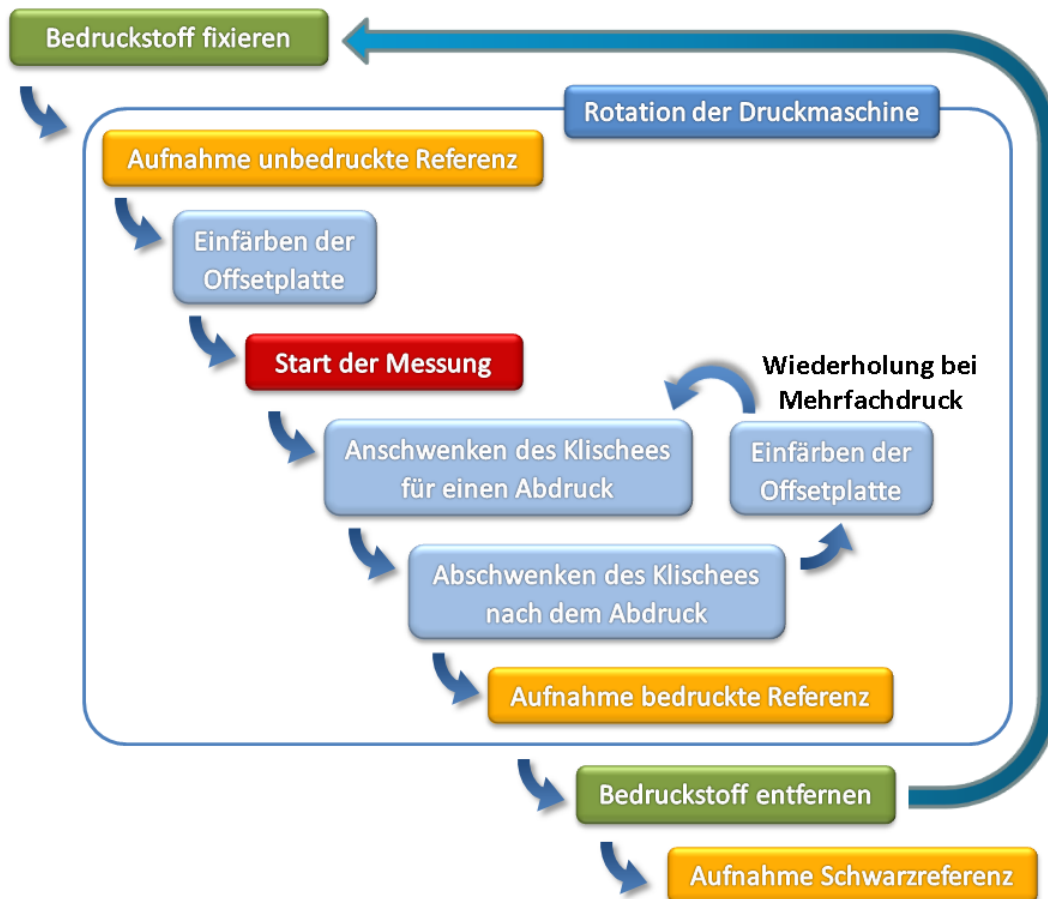
- Anstatt eines Gummituchs wird eine Flexodruckform auf den Gummituchzylinder (GZ) aufgeklebt. Es wird darauf geachtet, dass die Gesamtdicke (Unterbau + Druckform) gleich bleibt.
- Auf den Druckzylinder (DZ) wird wie bei *Pawlowski* [38] der Bedruckstoff aufgeklebt.
- Als Beleuchtung wird die Leuchtstoffröhre *LUMILUX® DE LUXE 954 Daylight* von *Osram* verwendet, die einen hohen Farbwiedergabeindex besitzt und für Farbabgleiche entwickelt wurde [123].

Der Gummituchzylinder (GZ) ist der einzige in der Druckmaschine, dessen Lage der Achse verstellt werden kann. Daher muss darauf geachtet werden, dass die Dicken der Aufbauten auf dem Platten- und Gummituchzylinder denen im Offsetdruck entsprechen. Sonst ist ein Bedrucken des auf den Druckzylinder aufgeklebten Bedruckstoffs nicht möglich.

Der ursprüngliche Versuchsstand entstand, um Farbdichteänderungen von Offsetdruckfarben während der Trocknungsphase zu erfassen [38]. Dies war möglich, da die Mechanik der Bogenoffsetdruckmaschine verändert wurde. Erwähnt seien die Umsetzung des An- und Abschwenkens des Gummituchzylinders (GZ), der zu einer einmaligen Einfärbung des auf dem Druckzylinder aufgeklebten Bedruckstoffs führt

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

sowie die Integration eines Drehwinkelgebers an den Druckzylinder (DZ), dessen Signal der Zeilenkamera zur Positionsbestimmung dient. Die Kamera nimmt bei jeder Umdrehung die RGB-Werte von bis zu zehn definierten Positionen auf dem Druckbogen auf (siehe Abbildung 6.4). Der letztendliche Versuchsablauf ist in Abbildung 6.3 systematisch dargestellt.



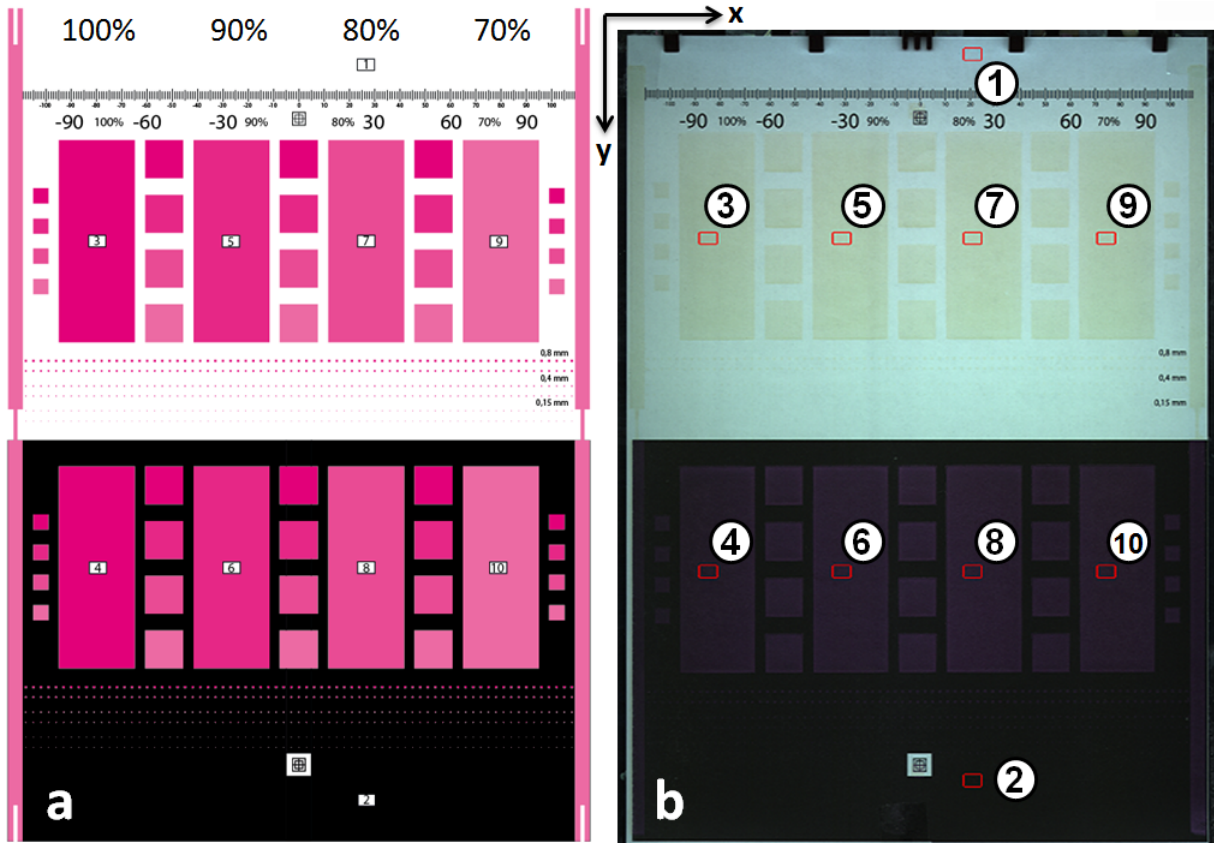
**Abbildung 6.3:** Versuchsablauf zur kamerabasierten Vermessung gedruckter Effektpigmentschichten (in Anlehnung an [38]). Vor dem Einfärben der Druckplatte und vor dem Stoppen der Druckmaschine wird jeweils eine Referenzbildaufnahme gemacht. Ein wiederholtes Einfärben und Abdrucken erfolgt bei den Versuchen mit Mehrfachdrucken. Am Ende jedes Versuchstags wird eine Schwarzreferenz bei ausgeschalteter Beleuchtung aufgenommen.

Die Bedruckstoffe sind bereits mit schwarz vorgedruckt, um die Effektpigmentschichten sowohl direkt auf den Bedruckstoff (weiße Stellen) als auch auf einem schwarzen Unterdruck applizieren zu können. Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, können bei dunklem Unterdruck sowohl die Interferenzfarben als auch Inhomogenitäten besonders gut erkannt werden.

Da das Druckinspektionssystem und die Auswerteeinheit aus der industriellen Praxis stammen, werden nur Daten aufgezeichnet, sofern auf dem Bedruckstoff Kontraste erkannt werden können, also bereits "Far-



be" verdruckt wurde. Durch den schwarzen Vordruck gelingt es, die Messung bereits vor dem Verdrucken der Effektpigmente zu starten. Eine reproduzierbare Positionierung des Bedruckstoffs auf dem Druckzylinder und damit zu den Effektpigmentfeldern und den Tracker-Positionen erlaubt eine vorgedruckte Längenskala, durch die der Bedruckstoff in Bezug zu den Greifern der Druckmaschine positionsgenau befestigt werden kann (siehe Abbildung 6.4b).



**Abbildung 6.4:** Layout der Druckform und Aufnahme bedruckte Referenz (Druckrichtung entgegengesetzt zur y-Richtung).

a: Das Layout des schwarzen Unterdrucks (UV-Farbe *Sicura Flex 39-6* von *Siegwerk* im Flexodruck [124]) und des in Magenta dargestellten Effektpigmentabdrucks. Zusätzlich eingezeichnet sind die Trackerpositionen (1  $\hat{=}$  Bedruckstoffweiß; 2  $\hat{=}$  schwarzer Unterdruck; 3, 5, 7, 9  $\hat{=}$  Effektpigmentfarbe auf Bedruckstoff; 4, 6, 8, 10  $\hat{=}$  Effektpigmentfarbe auf Schwarz) und die Bereiche unterschiedlicher Tonwerte (100 %, 90 %, 80 % und 70 %), die sich jeweils auf die beiden darunter befindlichen Felder beziehen. Innerhalb dieser Tracker misst die Kamera.

b: Vom Druckinspektionssystem aufgenommene bedruckte Referenz. Die roten Rechtecke stellen die realen Trackerpositionen dar und werden bei der Datenweiterverarbeitung zur Kontrolle für jeden Bogen mit MATLAB eingezeichnet. Am oberen Bildrand sind die Greifer der Druckmaschine erkennbar. Der Nullpunkt der Längenskala wird auf den mittleren Greifer ausgerichtet.

Nach dem Einschalten der Druckmaschine wird ein Referenzbild in unbedrucktem Zustand aufgenommen. Dadurch kann der Bogen später auf einen fehlerhaften Unterdruck oder Bedruckstoff hin überprüft

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

---

werden. Das Einfärben der Druckplatte erfolgt durch ein Aufspachteln der Effektpigmentfarbe. Der Drucker achtet dabei auf eine möglichst gleiche Farbverteilung auf den Einfärbewalzen. Im Gegensatz zum Offsetdruck, bei dem der Druckprozess ohne Eintrocknen der Farbe durch eine gleichmäßige Farbverteilung im Walzenstuhl reproduzierbar ist, gilt dies für eine wasserbasierte Flexodruckfarbe nicht. Das Druckergebnis ist zusätzlich zu den gewollten Parametervariationen von der Dauer und Gleichmäßigkeit der Einfärbung sowie von der aufgespachtelten Farbmenge und damit vom Bediener abhängig.

Der Start der Messung beginnt automatisch mit der Rotation der Druckmaschine. Vor dem Aufdruck erfolgt die Aufzeichnung der Messdaten für mindestens zehn Zylinderumdrehungen ( $> 4,8\text{ s}$ ). Dadurch können spätere Daten mit denen des unbedruckten Zustands verglichen werden. Danach erfolgt die Auslösung des Druckprozesses durch ein An- und Abschnen des Gummituchzylinders für ein einmaliges Einfärben und Abdrucken der darauf aufgeklebten Flexodruckform. Die Aufnahme des bedruckten Referenzbildes geschieht nach ungefähr fünfeinhalbminütiger Rotation der Druckmaschine.

Da bei einem einmaligen Aufdrucken der Effektpigmentfarbe auf verschiedene Bedruckstoffe sich die aufgezeichneten RGB-Daten der Tracker teilweise nur geringfügig ändern, wurde der größte Teil der Druckproben durch einen dreimaligen Aufdruck erzeugt. Dazu wird die Einfärbung der Offsetplatte auf dem Plattenzylinder und der Abdruckvorgang nach einiger Zeit wiederholt. Es entstehen dicker gedruckte Schichten.

Am Ende jedes Drucktages wird eine Schwarzreferenz bei ausgeschalteter Beleuchtung aufgenommen. Für jedes Messfeld wird aus diesem Kamerabild ein Schwarzoffset ermittelt, der von den während der Versuchsphase aufgenommenen RGB-Werten subtrahiert wird. So können Streulichteinflüsse und thermische Umgebungsbedingungen zusätzlich kompensiert werden [38]. Alle durchgeführten Druckversuche fanden bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 31% und 63% und Temperaturen zwischen  $19^{\circ}\text{C}$  und  $25^{\circ}\text{C}$  statt.

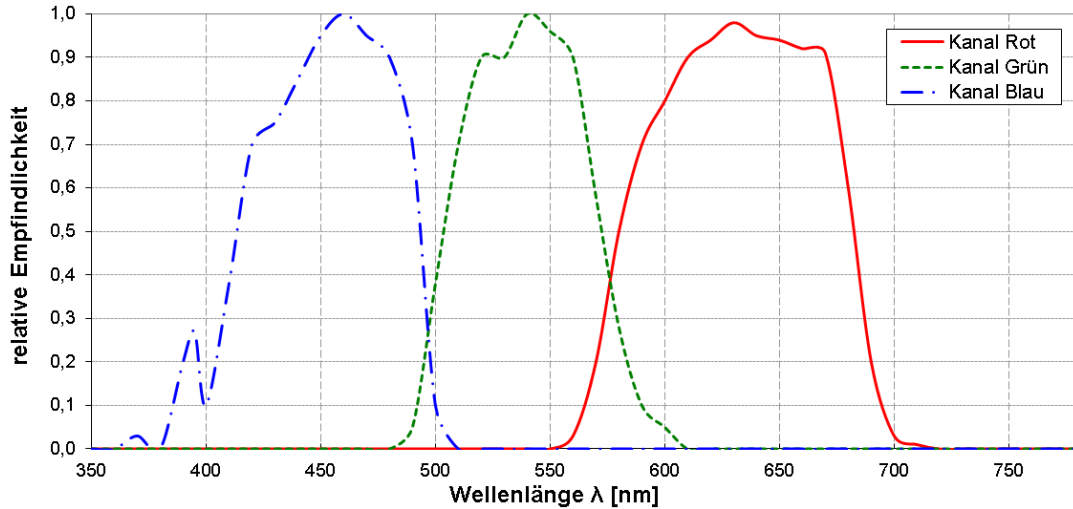
Die Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgt mit MATLAB. Eine Darstellung der Messergebnisse erfolgt überwiegend über die Zeit oder die Anzahl der Zylinderumdrehungen. Die Helligkeitswerte werden durch eine Transformation der aufgezeichneten RGB-Werte in den CIELAB-Farbraum (siehe Kapitel 2.3.3) mit der Funktion *colorspace* [125] in MATLAB berechnet.

Auf die einzelnen Elemente des Versuchsaufbaus wird im Folgenden näher eingegangen.

### 6.1.1 Kamera

Die für das Druckinspektionssystem verwendete Zeilenkamera *XIIMUS* von *TVI-Vision* [126] teilt das einfallende Licht über Prismen in drei Kanäle auf, die jeweils einen Sensor zur Detektion besitzen. Die relative Empfindlichkeiten der RGB-Kanäle sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Sie erlauben eine gute und wahrnehmungsgetreue Abbildung des gesamten Spektrums im sichtbaren Bereich [38]. Der Sensor der Zeilenkamera besitzt 2048 Pixel (8-bit Pixel  $\Rightarrow$  256 Werte). Die Kamera ist so positioniert, dass die

gesamte Breite des Druckzylinders erfasst wird.



**Abbildung 6.5:** Relative Empfindlichkeit der RGB-Kanäle der Zeilenkamera *XIIMUS* von *TVI-Vision* aufgetragen über die Wellenlänge  $\lambda$  [38, 126]

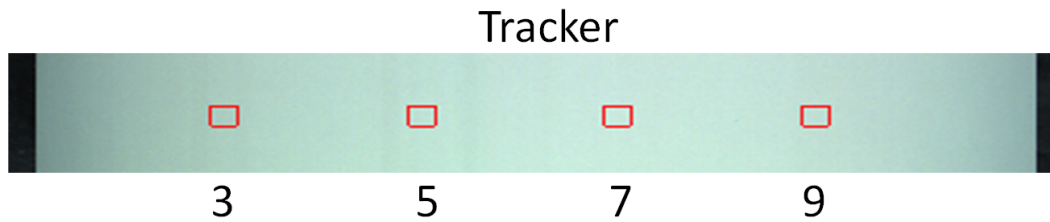
Die als Tracker bezeichneten Messfelder der Zeilenkamera (siehe Abbildung 6.4) setzen sich aus mehreren Pixeln einer Seitenlänge von  $0,05\text{ mm}$  zusammen. Die Größe der Pixel ist durch die Kamera und ihre Entfernung zum Messobjekt bestimmt [38]. Um eine Mittelung der Informationen möglichst vieler Pixel auf den gedruckten Effektpigmentschichten zu erhalten, wird die Trackerfläche maximiert. Eine große Fläche ermöglicht die Messung einer statistisch gleichmäßigeren Pigmentverteilung. Die Kamerasoftware erlaubt eine Trackerhöhe von  $4,6\text{ mm}$  und eine -breite von  $6,8\text{ mm}$  (Flächeninhalt:  $31,28\text{ mm}^2$ ). Sie gibt für jeden Tracker und Kanal einen über alle beteiligten Pixel gemittelten Wert heraus. Die Ausdehnung der Tracker in Druckrichtung wird durch mehrere aufeinanderfolgende Aufnahmen einer Zeile realisiert. Dabei ist die Belichtungszeit der Kamera auf die Druckgeschwindigkeit und die Beleuchtungssituation anzupassen. Dies geschieht mit der Software des Druckinspektionssystems, die die Qualität der Daten bei unterschiedlichen Belichtungszeiten und Druckgeschwindigkeiten simulieren kann. Für Druckproben, die bei einer Druckgeschwindigkeit von  $26\frac{\text{m}}{\text{min}}$  hergestellt werden, wird eine Belichtungszeit von  $160\mu\text{s}$  gewählt, für die mit  $74\frac{\text{m}}{\text{min}}$  gedruckten  $80\mu\text{s}$  wie bei Pawlowski [38].

Eine Auswertung der aufgezeichneten RGB-Daten und die Berücksichtigung unterschiedlicher Belichtungszeiten setzt eine Linearität der Kamera voraus. Das heißt, dass für alle Pixel die Lichtenergie als Eingangsgröße direkt proportional zur erzeugten elektrischen Spannung als Ausgangsgröße sein muss. Bei doppelt so langer Belichtungszeit wird ein doppelt so starkes Signal erwartet. Da eine Überprüfung der Linearität einzelner Pixel kaum realisierbar ist, werden dazu diejenigen verwendet, die in den Trackerfeldern zusammengefasst sind. Um die Linearität der einzelnen Felder zu überprüfen, wird das unbedruckte

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

---

Papier *Maxi Satin* bei Belichtungszeiten von  $20 - 200 \mu\text{s}$  bei einer Druckgeschwindigkeit von  $26 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  gemessen. Anschließend erfolgt eine Mittelung über 30 Messungen (Umdrehungen) der Tracker 3, 5, 7 und 9 (siehe Abbildungen 6.6 und 6.7).



**Abbildung 6.6:** Ausschnitt über die Bedruckstoffbreite des Papiers *Maxi Satin* bei einer Belichtungszeit von  $160 \mu\text{s}$ . Es sind leicht unterschiedliche Helligkeiten an den Trackerstellen erkennbar, die zu verschiedenen Geradensteigungen in Abbildung 6.7 führen. Die leichte Verschmutzung des Papiers (zwei Streifen um Tracker 5) betrifft nicht die Stellen der Tracker.

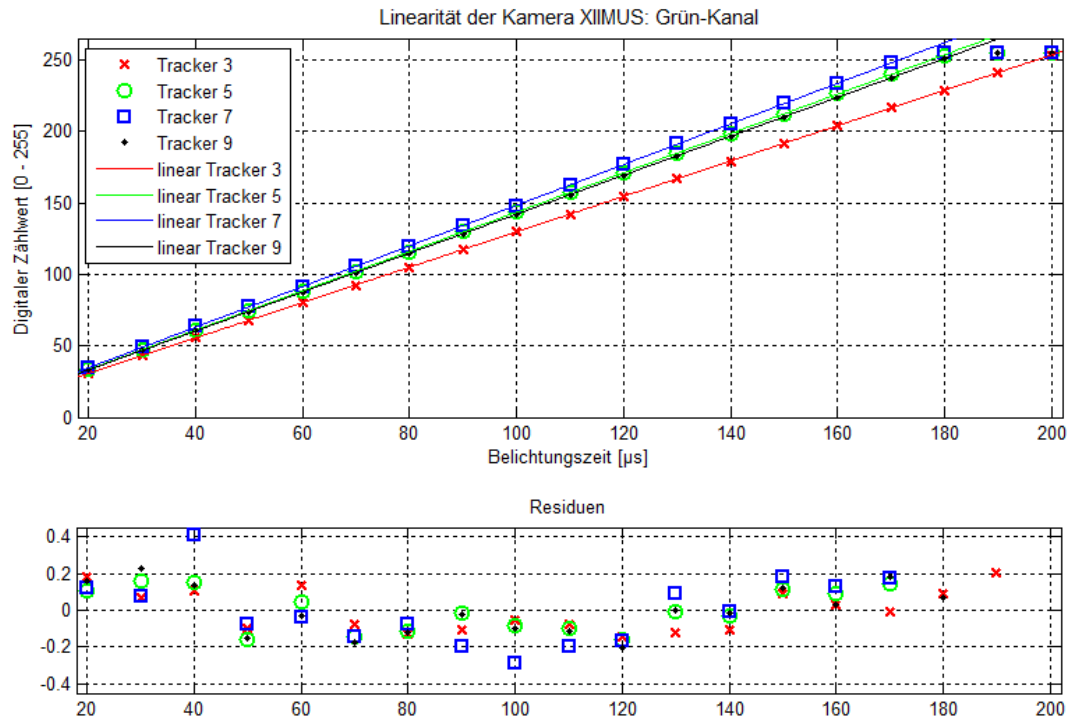
Da sich die restlichen Tracker direkt unter- oder oberhalb der in Abbildung 6.6 gezeigten befinden, werden sie von der Zeilenkamera mit denselben Pixeln detektiert. Bei homogenem und unverschmutztem Papier sowie sich zeitlich kaum ändernder Beleuchtungsstärke zeigen die restlichen Tracker nicht unterscheidbare Ergebnisse und sind deshalb in Abbildung 6.7 nicht dargestellt. Beispielhaft werden die Werte des Grün-Kanals gezeigt. Die Werte des Rot- und Blau-Kanals befinden sich im Anhang C (Abbildungen C.1 und C.2).

Die Linearität der Kamera stellt sich damit als sehr gut heraus. Die unterschiedlichen Steigungen der Geraden können durch die unterschiedlichen Helligkeiten über die Druckbreite durch die Abbildungen 6.6 und 6.12 erklärt werden. Erwartungsgemäß ist die Steigung der Gerade von Tracker 3 am kleinsten, die von Tracker 7 am größten. Um nicht Messdaten außerhalb des linearen Bereichs der Kamera aufzuzeichnen und trotzdem eine gute Beleuchtung der weißen und schwarzen Bereiche der Druckbogen (siehe Abbildung 6.4) zu erreichen, erfolgen keine Versuche mit Belichtungszeiten größer als  $160 \mu\text{s}$ .

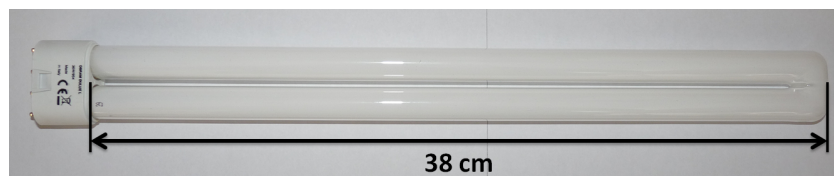
### 6.1.2 Beleuchtung

Zur Beleuchtung der Detektionsstelle wird die Leuchtstoffröhre *LUMILUX® DE LUXE 954 Daylight* von *Osram* (siehe Abbildung 6.8) verwendet, die für einen absolut korrekten Farbabgleich entwickelt wurde und mit der sich die Normlichtart D50 annähernd realisieren lässt. Diese hat einen Farbwiedergabeindex größer als 90 bei einer Farbtemperatur von 5400 Kelvin und bietet dadurch sehr gute Farbwiedergabeeigenschaften [123].

Dennoch besitzen Leuchtstoffröhren aufgrund der Nutzung fluoreszierender Leuchtstoffe, die durch eine Gasentladung erzeugte UV-Strahlung in sichtbares Licht umwandeln, kein kontinuierliches Spektrum. Abbildung 6.9 zeigt das Emissionsspektrum der Leuchte in der Aufwärmphase der Lampe. Dieses wurde



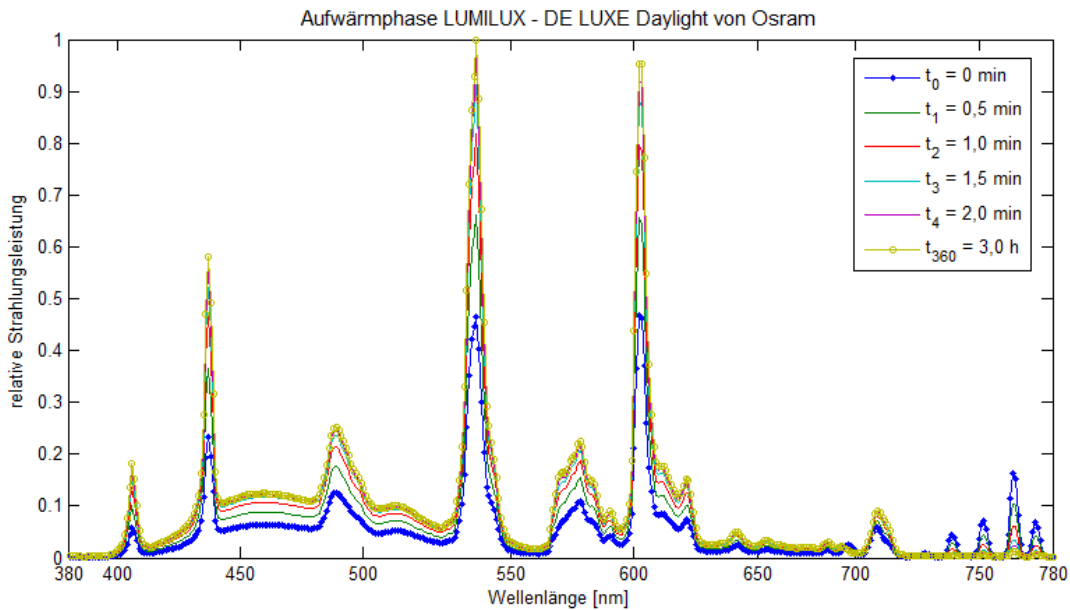
**Abbildung 6.7:** Ausgabewerte der Tracker 3, 5, 7 und 9 des Grün-Kanals der Kamera *XIIMUS* von *TVI-Vision* über die Belichtungszeit. Es ist eine sehr gute Linearität der Kamera durch die kleinen Residuen der linearen Fits der einzelnen Trackerwerte erkennbar. Die Steigungen der Geraden unterscheiden sich aufgrund einer nicht ganz homogenen Beleuchtung über die Druckbreite. Ab einer Belichtungszeit  $> 170 \mu\text{s}$  ist der maximale Wert des Kamera-Sensors (255) erreicht und die Linearität der Kamera beendet. Diese Werte werden vom Fit ausgeschlossen.



**Abbildung 6.8:** *LUMILUX<sup>®</sup> DE LUXE 954 Daylight* von *Osram* in der *DULUX*-Ausführung (Doppelröhre)

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

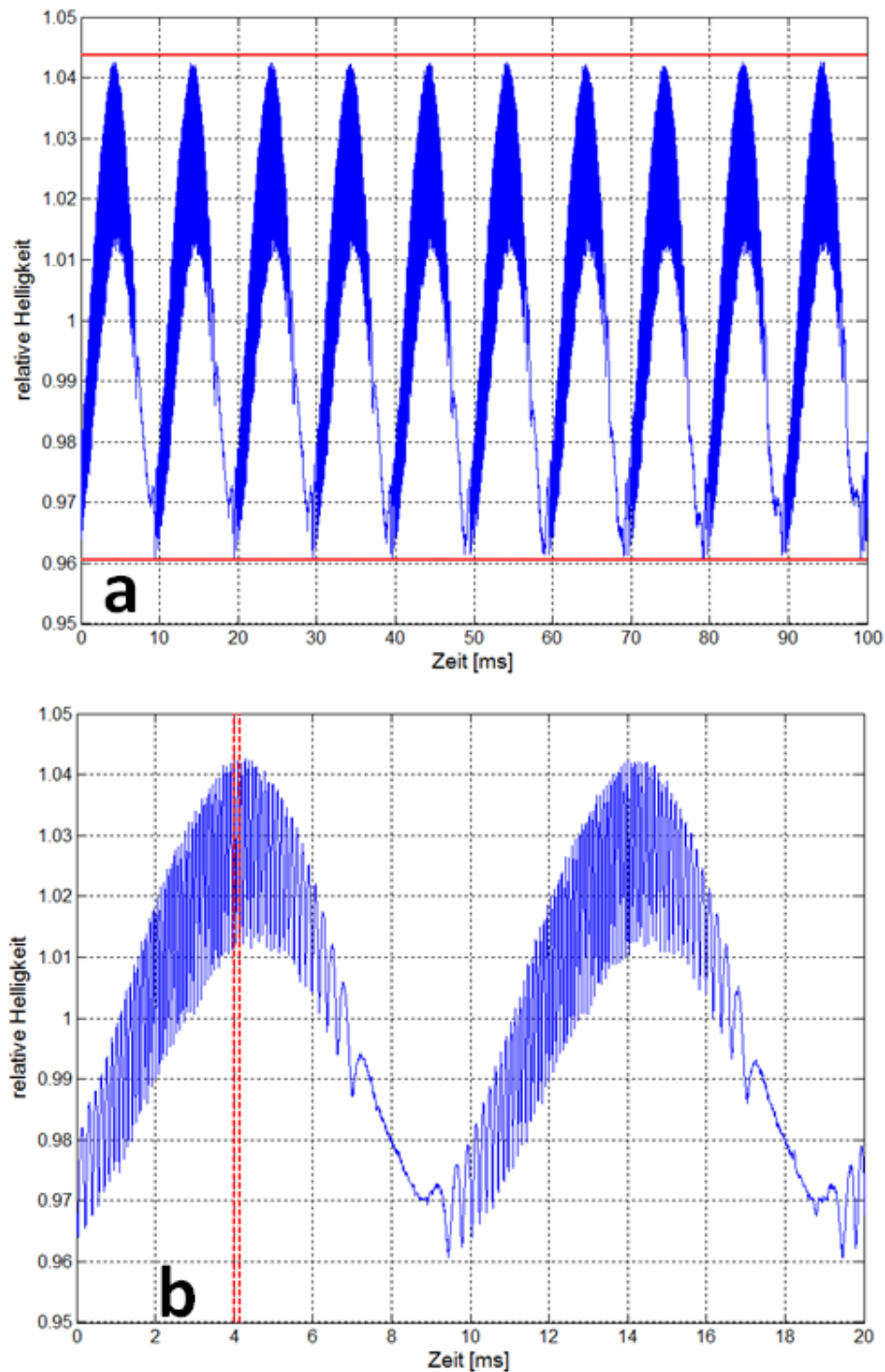
mit dem Spektroradiometer *Konica Minolta CS-1000A* alle 30 s über drei Stunden lang in 1 nm Schritten gemessen. Die Spektren nach zwei Minuten ( $t_4$ ) und drei Stunden ( $t_{360}$ ) unterscheiden sich nur geringfügig. Die der Zeiten  $t_5$  bis  $t_{359}$  liegen dazwischen und werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 6.9 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Leuchte schon nach wenigen Minuten eine stabile Strahlungsleistung erreicht hat. Um dies während der Versuche voraussetzen zu können, wird sie mindestens 30 Minuten vor Versuchsbeginn eingeschaltet.



**Abbildung 6.9:** Spektrum der Leuchte *LUMILUX® DE LUXE 954 Daylight* von *Osram* während der Aufwärmphase. Das Emissionsspektrum der Leuchte wird nach unterschiedlichen Zeiten nach dem Einschalten mit dem Spektroradiometer *Konica Minolta CS-1000A* in 1 nm Schritten gemessen. Für den Zeitpunkt direkt nach dem Einschalten  $t_0$  und nach drei Stunden  $t_{360}$  sind die Messpunkte eingetragen.

Zusätzlich wird überprüft, ob ein Rauschen der Kameraaufnahmen durch zeitliche Schwankungen der Emissionsleistung der Leuchte begründet werden kann. Dies ist bei Belichtungszeiten von 80 – 160  $\mu s$  sinnvoll. Dazu wird mit der High-Speed Kamera *Fastcam SA4* von *Photron* die Leuchte fokussiert und mit einer Framerate von 100.000 *fps* eine Sekunde lang gefilmt. Die Bilder werden bezüglich ihrer Helligkeit mit MATLAB ausgewertet. In den Abbildungen 6.10 und 6.11 ist die relative Helligkeit über die Zeit aufgetragen, wobei der Wert 1 die mittlere Helligkeit aus allen 100.000 Bildern darstellt.

Daraus ist erkennbar, dass die relative Helligkeit um ungefähr 4% um ihren Mittelwert schwankt. Bei weiteren Vergrößerungen sind Oberschwingungen mit einer Schwingungsdauer um die 90  $\mu s$  zu erkennen. Letztere machen sich bei oben genannten Belichtungszeiten der Kamera kaum in den gemessenen Werten bemerkbar, da diese Zeiten die der Schwingungsdauer der Oberschwingung überschreitet. Anders zeigt sich das bei der niederfrequenten Schwingung in den Abbildungen ??a und b. Je nachdem wann



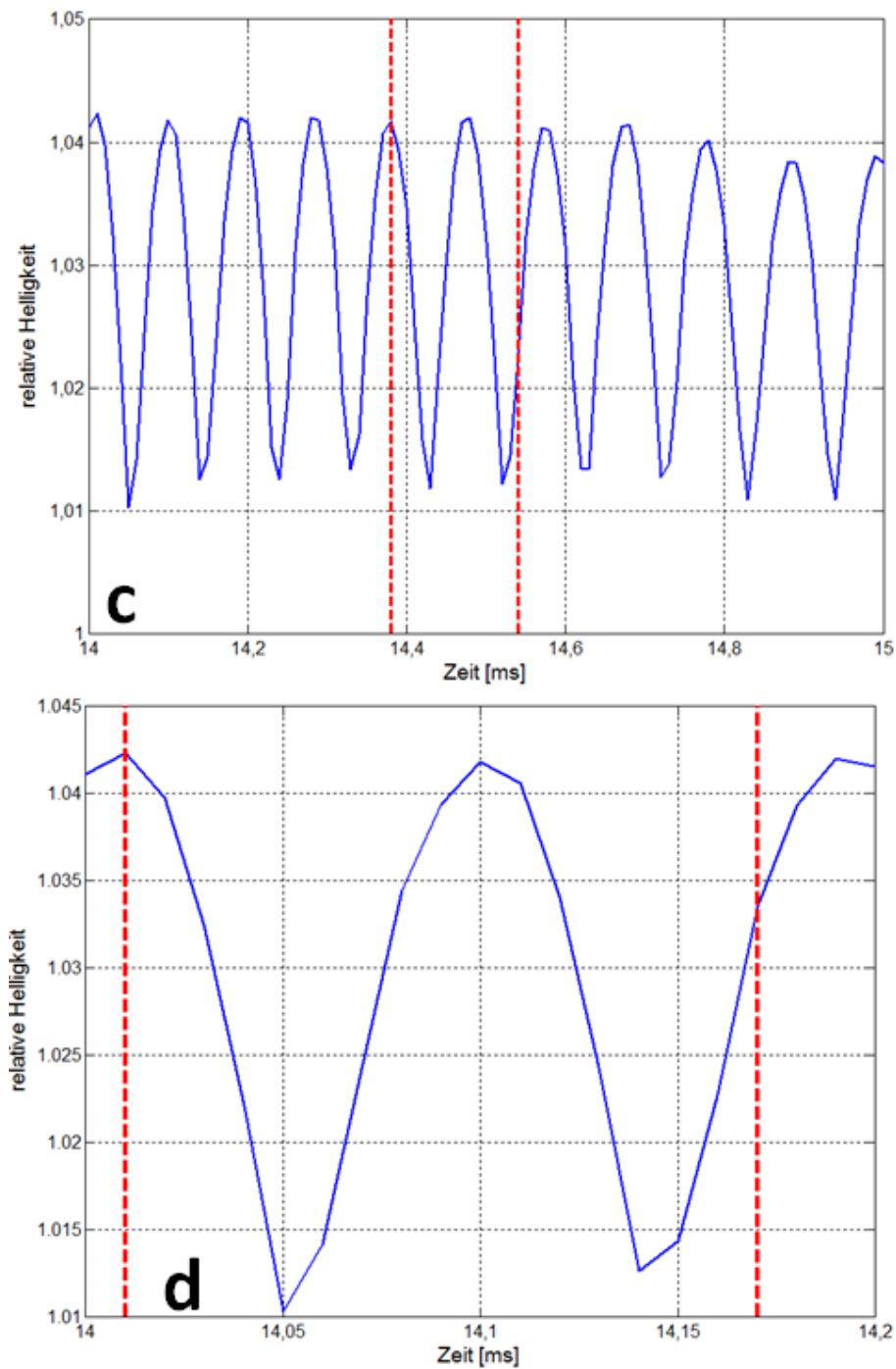
**Abbildung 6.10:** Schwankung der relativen Helligkeit der Leuchte *LUMILUX® DE LUXE 954 Daylight* aufgenommen mit der High-Speed Kamera *Fastcam SA4* von *Photron*.

a: Es ist ersichtlich, dass die Helligkeit um ca. 4 % um den Mittelwert 1 schwankt, was durch die horizontalen Linien deutlich wird. Die Schwingungsdauer beträgt ca. 10 ms.

b: Ungefähr zwei Perioden sind hier abgebildet. Es sind Oberschwingungen erkennbar.

Die gestrichelten vertikalen Linien in b stellen ein Zeitintervall von 160  $\mu$ s dar, was der am häufigsten verwendeten Belichtungszeit der Kamera entspricht.

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN



**Abbildung 6.11:** Schwankung der relativen Helligkeit der Leuchte *LUMILUX<sup>®</sup> DE LUXE 954 Daylight* aufgenommen mit der High-Speed Kamera *Fastcam SA4* von *Photron*.

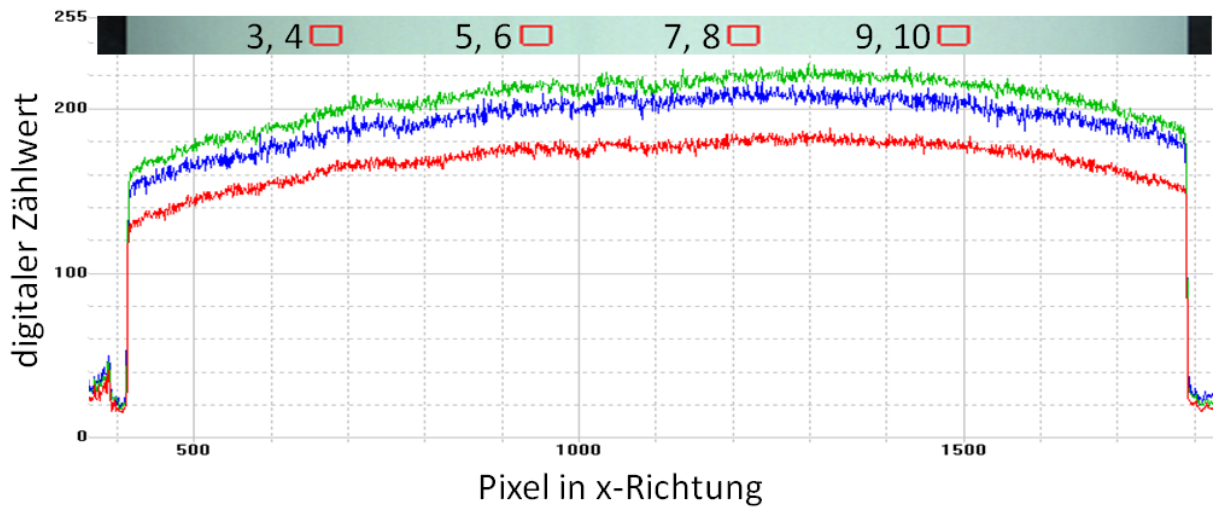
c und d: Im Bereich eines Maximums der Schwingung sind die Oberschwingungen vergrößert dargestellt. Deren Schwingungsdauer beträgt ungefähr 88  $\mu\text{s}$ .

Die gestrichelten vertikalen Linien stellen ein Zeitintervall von 160  $\mu\text{s}$  dar, was der am häufigsten verwendeten Belichtungszeit der Kamera entspricht.



eine Kameraaufnahme erfolgt, können unterschiedliche Helligkeiten auftreten. Damit kann ein mögliches Rauschen in den aufgezeichneten RGB-Werten der Kamera erklärt werden.

Abschließend wird die Ausleuchtung der Detektionsstelle der Kamera durch die Beleuchtung betrachtet. Wie in den Abbildungen 6.6 und 6.7 ersichtlich, weisen die Stellen der Tracker 3, 5, 7 und 9 bzw. 4, 6, 8 und 10 unterschiedliche Werte auf. Deshalb wird die Beleuchtung über die Druckbreite für alle Kanäle in Abbildung 6.12 dargestellt.



**Abbildung 6.12:** RGB-Werte bei einer Belichtungszeit von  $160\mu s$  und einer Beleuchtung mit der *LUMILUX® DE LUXE 954 Daylight* über die Pixel des Zeilensensors der Kamera. Der mittlere Bereich stellt die Papierbreite des unbedruckten Bedruckstoffs (*Maxi Satin*) dar, die oben zusammen mit den Trackern, die sich an den eingezeichneten Positionen der x-Achse befinden (siehe Abbildungen 6.4 und 6.6), zusätzlich dargestellt ist. Es liegt keine konstante Beleuchtung über die Druckbreite vor.

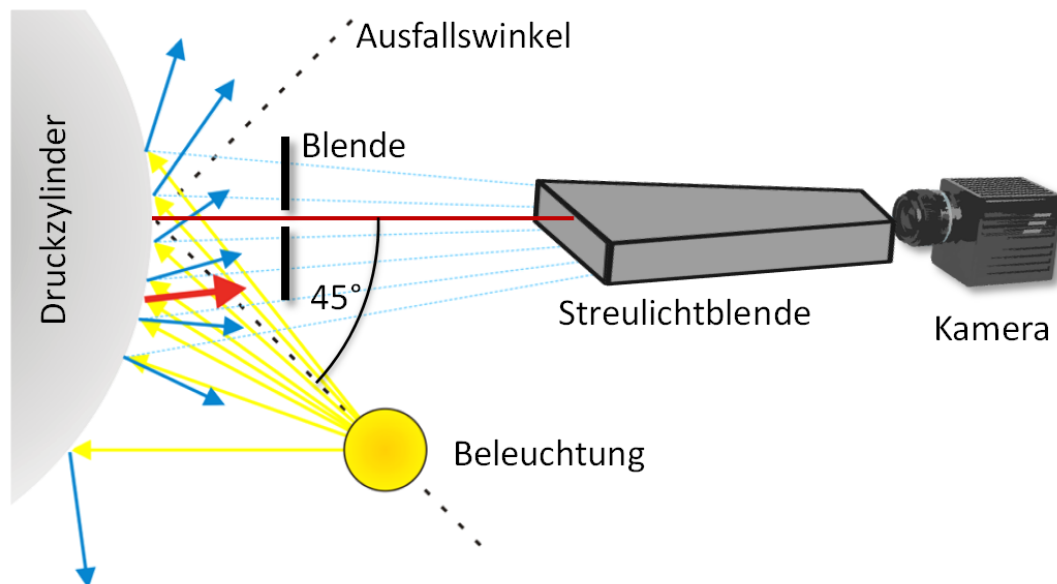
Die Sensoren der Zeilenkamera zeichnen bei einer Belichtungszeit von  $160\mu s$  zwischen  $x \approx 410$  bis  $x \approx 1790$  die gesamte Druckbreite auf. Deutlich erkennbar ist der Bereich des unbedruckten Papiers *Maxi Satin*. Die Beleuchtung über die Papierbreite ist bei allen Kanälen nicht konstant. Aufgrund der Abbildungen 6.12 und 6.6 können die unterschiedlichen Steigungen der gefitteten Geraden in Abbildung 6.7 durch die ungleichmäßige Beleuchtung über die Druckbreite erklärt werden. Tracker 7 und 8 befinden sich am nächsten an der Stelle der maximalen Beleuchtungsstärke. Der Ort der Tracker 3 und 4 wird am geringsten beleuchtet.

### 6.1.3 Blenden

Zur Vermeidung der Detektion von Oberflächenreflexionen und Streulicht aus der Umgebung sind in dem Versuchsstand zwei Blenden integriert (siehe Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.13). Die Blende verhindert dabei weitgehend, dass Direktreflexionen zur Kamera gelangen, was für den ursprünglichen Zweck der Farbdichtemessung ohne Polarisationsfilter wichtig war. Die ebenfalls mit schwarzem Velours verkleidete

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

Streulichtblende sorgt für eine Abschirmung und Absorption von Streulicht aus der Umgebung. Es kann angenommen werden, dass fast ausschließlich diffus auf dem Bogen und den gedruckten Schichten gestreutes Licht der Leuchte auf den Sensor der Kamera gelangt.

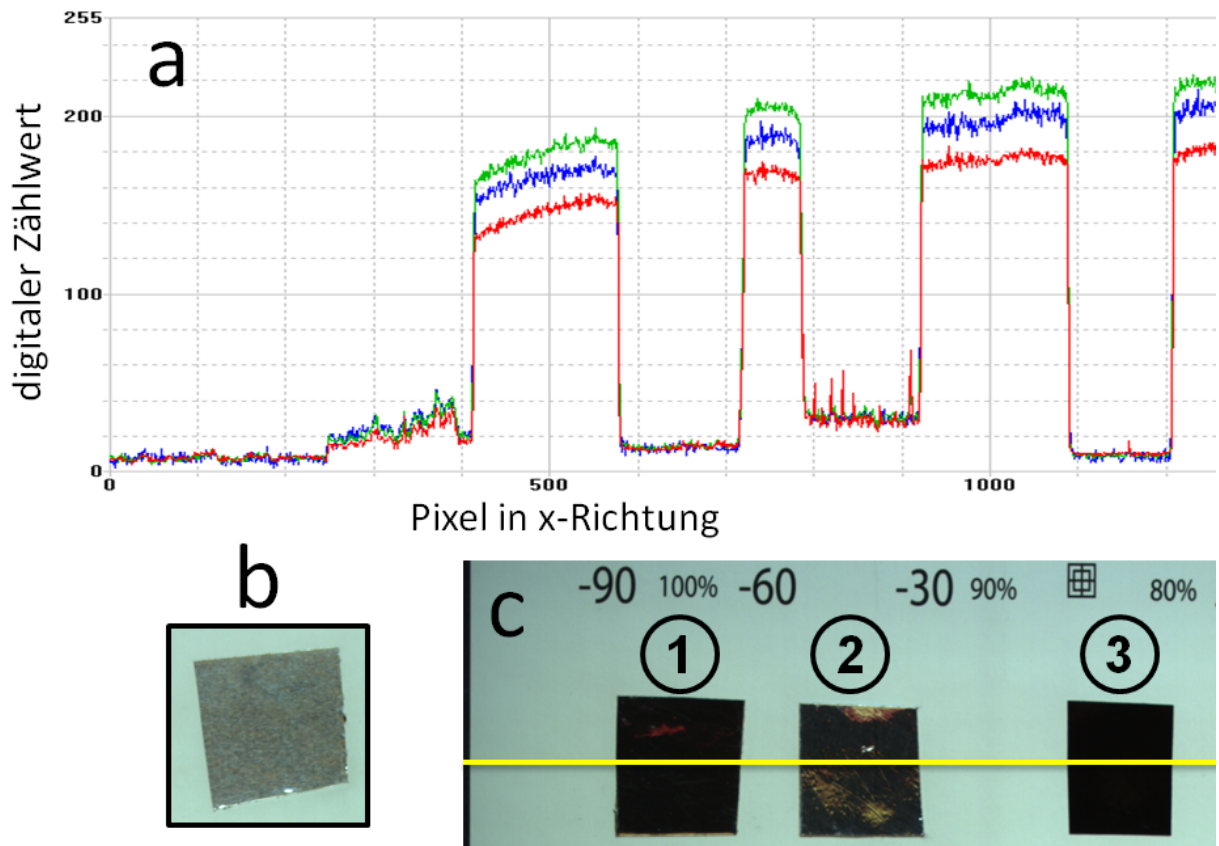


**Abbildung 6.13:** Geometrie der Messwertaufnahme (in Anlehnung an [38]). Die dünnen (blauen) Pfeile stellen potenzielle Richtungen von direkten Reflexionen dar, der dicke (rote) Pfeil eine Direktreflexion entfernt vom Messort. Während die Blende die Detektion von Direktreflexionen verhindert, vermeidet die Streulichtblende weitgehend, dass Streulicht aus der Umgebung von der Kamera gemessen wird.

Um dies nachzuprüfen, werden auf einen Bogen folgende glänzende Materialien aufgebracht (siehe Abbildung 6.14) und mit der Kamera aufgezeichnet:

- Aluminiumklebeband (leicht aufgebracht), Abbildung 6.14b
- Aluminiumfolie, Abbildung 6.14c(1)
- Aluminiumklebeband (fest aufgebracht), Abbildung 6.14c(2)
- mit Glanzlack überdruckte schwarze Druckprobe, Abbildung 6.14c(3)

Dadurch, dass sich die silberne Probe c(1) und die schwarze c(3) in ihren Aufnahmen kaum unterscheiden, wird gezeigt, dass keine direkt von der Oberfläche reflektierte Strahlung von der Kamera aufgenommen wird. Bei dem Aluminiumklebeband ist interessant, dass das nach dem Aufkleben fest aufgedrückte Folienstück c(2) ebenfalls fast schwarz erscheint, während das leicht aufgeklebte b einen silbernen Eindruck vermittelt. Durch das Aufdrücken werden leichte Unebenheiten beseitigt, wodurch mehrheitlich Direktreflexion auftritt, die durch die Blende nicht in die Kamera gelangt.



**Abbildung 6.14:** Aufnahme glänzender Objekte mit dem Druckinspektionssystem.

a: RGB-Werte entlang der in c eingezeichneten gelben Linie

b: leicht aufgeklebtes Aluminiumklebeband

c: weitere glänzende Schichten (1) Aluminiumfolie, (2) fest aufgeklebtes Aluminiumklebeband, (3) mit Glanzlack überdruckte schwarze Druckprobe

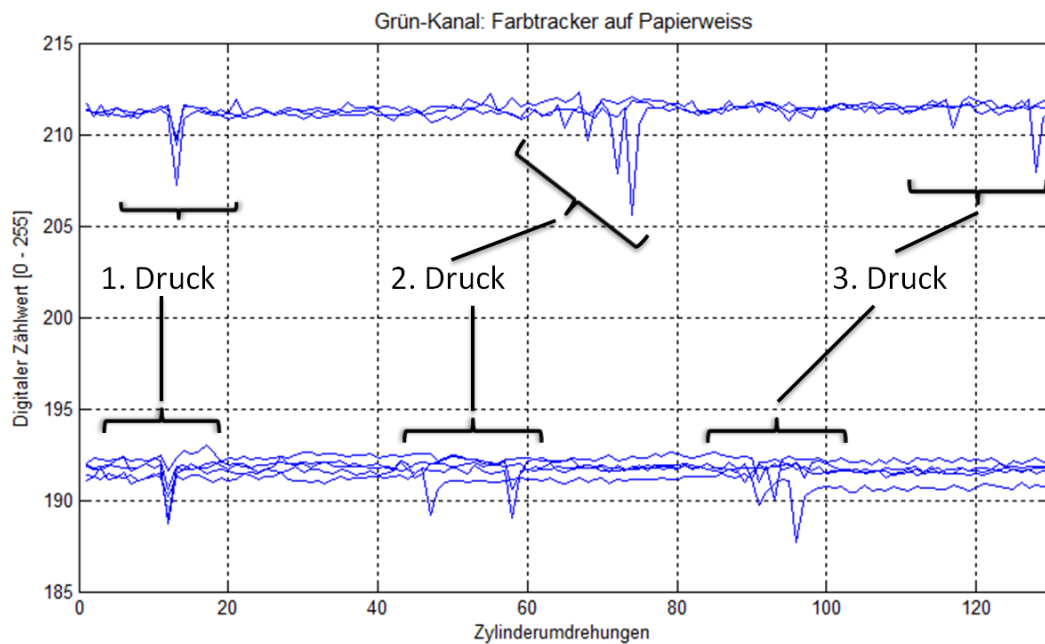
Probe c(3) hat denselben Glanzwert, wie die Glanzreferenz des Glanzmessgerätes. Die Proben b und c(2) bestehen aus der gleichen Folie. Je nachdem, ob diese nach dem Aufkleben noch fest aufgedrückt wird oder nicht, entstehen unterschiedliche Aufnahmen.

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

Der Blendenspalt wurde nach einigen Versuchen von  $1\text{ mm}$  auf  $2\text{ mm}$  vergrößert, um insgesamt höhere Messwerte zu erhalten. Dies war durch die Detektion weißer und schwarzer Bereiche bei gleicher Beleuchtung sinnvoll. Abbildung 6.14 zeigt, dass trotz einer Blendenspaltvergrößerung das Prinzip des Versuches erhalten bleibt. Es sollen keine Direktreflexionen aufgezeichnet werden. Dies wird ausgenutzt, um eine Umorientierung der Pigmente nach dem Verdrucken zu untersuchen.

### 6.1.4 Dynamik beim Druckvorgang

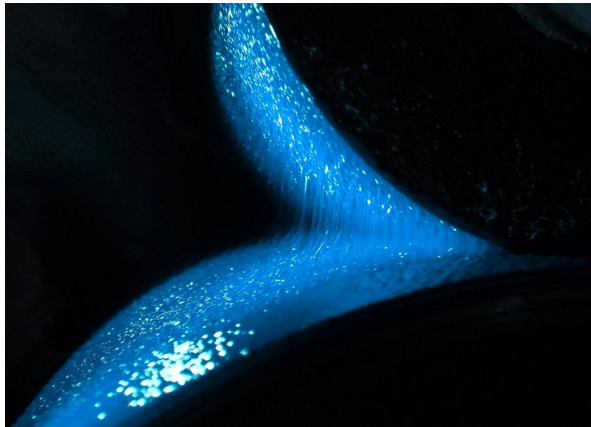
Durch das An- und Abschnellen des Gummituchzylinders und das Drucken entstehen Maschinenschwingungen, die sich ebenfalls auf die Aufzeichnung der RGB-Daten mit der Zeilenkamera auswirken können. Obwohl die Messwertaufnahme nicht von einer geringfügigen Abstandsänderung der Entfernung zwischen Druckzylinder und Kamera beeinflusst werden sollte [38], kann der Druckprozess die Messdaten verändern.



**Abbildung 6.15:** Grün-Kanal einiger Tracker auf Papierweiß. Es sind die Messkurven einiger Tracker der Position 1 auf dem Papier *Maxi Satin* bei zwei unterschiedlichen Blendenspalteinstellungen und Druckversuchen über die Zylinderumdrehungen abgebildet. Das “Drucken ohne Druckfarbe” (1. bis 3. Druck) bewirkt ein kurzzeitiges Absinken des Messwertes. Die Messwertänderung bei “1. Druck” liegt durch den MATLAB-Code zur Datenauswertung auf derselben Stelle der Abszisse. Die weiteren “Drucke” fanden abhängig vom Bediener nach unterschiedlich vielen Zylinderumdrehungen statt.

Da sich die Messwerte durch den Druckprozess auch ohne einen Farbauftrag kurzfristig ändern können (siehe Abbildung 6.15), ist vor allem der erste Messwert nach dem Aufdruck kritisch zu betrachten. Wie in Abbildung 6.4 ersichtlich, wird der Tracker 1 als erster nach dem Andrücken des Gummizylinders auf

den Druckzylinder gemessen, wodurch die Amplitude der Maschinenschwingung dort im Vergleich zu den später aufgenommenen Trackern am größten ist. Des Weiteren hat *Pawlowski* [38] gezeigt, dass unmittelbar nach dem Aufdruck der Farbspaltungsprozess die Kameramessungen zusätzlich beeinflusst. Dieser ist zwar bei Offsetdruckfarben deutlich intensiver ausgeprägt als bei Flexodruckfarben (siehe Abbildung 6.16), wird aber trotzdem als weiterer Grund angesehen, die ersten Messdaten nach dem Drucken in Frage zu stellen.



**Abbildung 6.16:** Farbspaltung von Offsetdruckfarbe zwischen zwei Walzen [38]

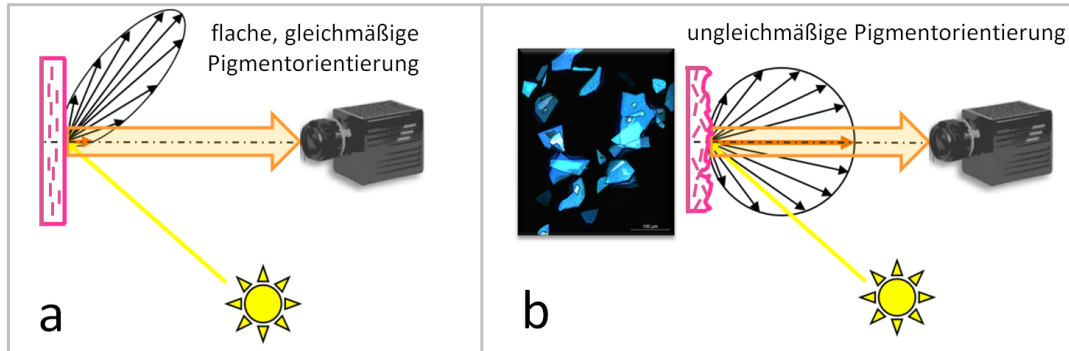
Im Folgenden wird deshalb der erste Messwert aller Tracker nach dem Farbauftrag nicht für die Auswertung herangezogen.

## 6.2 Untersuchung der Pigmentorientierung

Ein Ziel dieses Kapitels ist es, eine mögliche Umorientierung von Effektpigmenten nach dem Verdrucken zu untersuchen. Da sich die Verlaufszeit bis zum Trocknereinsatz nach den Erkenntnissen aus Kapitel 5.4.4 negativ auf den Color-Shift auswirkt, wird eine Umorientierung der Pigmente aus einer parallelen Lage zum Bedruckstoff nach dem Abdrucken vermutet, was zu überprüfen ist. Dazu werden kamerabasierte Messungen gedruckter Effektfarben in dem beschriebenen Versuchsstand durchgeführt. Dabei wurden die in Tabelle 6.1 aufgelisteten Parameter variiert und die RGB-Werte der Kamera aufgezeichnet. Je parallel sich die Pigmente zum Bedruckstoff orientieren, desto größer sollte der Color-Shift und Glanz der Effektpigmentschichten sein und desto weniger Lichtreflexionen sollten von der Kamera detektiert werden. Es hat sich gezeigt, dass sich mit einem Mikroskop beobachtete Änderungen im Orientierungsverhalten der Pigmente makroskopisch in einer Änderung der optischen Parameter wie Farbe und Glanz bemerkbar machen [1]. Da erwartet wird, dass sich eine Orientierungsänderung der Pigmente am besten durch eine Helligkeitsänderung darstellen lässt, werden die RGB-Daten der Kamera mit MATLAB durch die Funktion *colorspace* [125] in den CIELAB-Farbraum transformiert und die Helligkeitswerte  $L^*_K$  betrachtet.

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

Diese sind die aus den RGB-Daten der Kamera (K) berechneten  $L^*$ -Werte des Farbraums. Abbildung 6.17 verdeutlicht die erwarteten Auswirkungen der Pigmentorientierung auf die Messdaten der Kamera. Bei



**Abbildung 6.17:** Reflexion in Abhängigkeit von der Pigmentorientierung (in Anlehnung an [38]).

a: gerichtete Reflexion bei paralleler Pigmentorientierung, nicht von der Kamera detektierbar

b: diffuse Reflexion bei ungleichmäßiger Pigmentorientierung, von der Kamera detektierbar

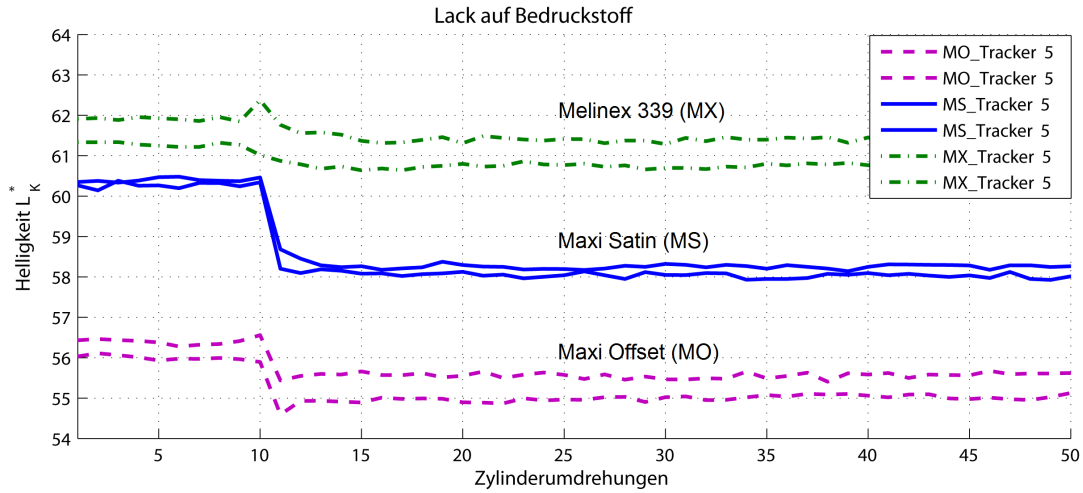
gleichmäßiger Pigmentverteilung wird durch eine stärkere gerichtete Reflexion ein dunkleres Kamerabild als bei einer ungleichmäßigeren erwartet. Ändert sich die Helligkeit über die Zeit nach dem Aufdruck, so kann das ebenfalls auf die Pigmentorientierung zurückgeführt werden. Steigt die Helligkeit nach dem Abdrucken der Effektpigmentfarbe, so wird eine Desorientierung der Pigmente aus einer anfänglich parallel zum Bedruckstoff befindlichen Lage vermutet, sinkt sie, so orientieren sich die Pigmente zunehmend flach zum Bedruckstoff. Die Ausrichtung der Pigmente und damit die Messwerte sind zudem stark vom Lack und der Rauheit und Saugfähigkeit des Bedruckstoffs abhängig [38].

Da ebenfalls der Lack, der zudem in das Papier wegschlagen kann, einen Einfluss auf die reflektierten Lichtstrahlen hat, wurde dieser ohne Pigmente verdruckt. Um weiterhin einen möglichst geringen Einfluss auf die Farbwirkung der Effektpigmente zu haben, muss der Lack möglichst transparent sein [1]. Für alle Druckversuche mit Interferenzeffektpigmenten wurde deshalb derselbe Flexodrucklack verwendet wie bei den Versuchen in Kapitel 5. Abbildungen 6.18 und 6.19 zeigen die Veränderungen der Helligkeit  $L^*_K$  über die Zylinderumdrehungen beim einmaligen Aufdrucken des Lacks *FLHF00001* von *SunChemical* abhängig vom Bedruckstoff und vom Unterdruck.

**Tabelle 6.1:** Variation der Bedruckstoffe, Effektfarben und drucktechnischen Parameter

<b>Bedruckstoff</b>	<i>Maxi Offset</i>	<i>Maxi Satin</i>	<i>Melinex 339</i>	
	Naturpapier	Bilderdruckpapier	Folie - weiß	
Hersteller	Igepa Group	Igepa Group	DuPont	
Abkürzung	MO	MS	MX	
<b>Pigment</b>	<i>Colorstream</i>	<i>Iriodin 7215</i>	<i>Iriodin 211</i>	
	<i>T10-02 Arctic Fire</i>	<i>Ultra Rot</i>	<i>Rutil Feinrot</i>	
Hersteller	Merck	Merck	Merck	
Abkürzung	CS	IU	IF	
Pigmentkonz. [%]	5	10	20	
Tracker auf	Weiß+Pigment	Schwarz+Pigment	Weiß	Schwarz
Tonwert [%]	100	90	80	70
Druckgeschw. [ <i>m/min</i> ]	74	26		
Belichtungszeit [ <i>μs</i> ]	80	160		
Anzahl Drucke	1	2	3	4
Blendenspalt [ <i>mm</i> ]	1	2		

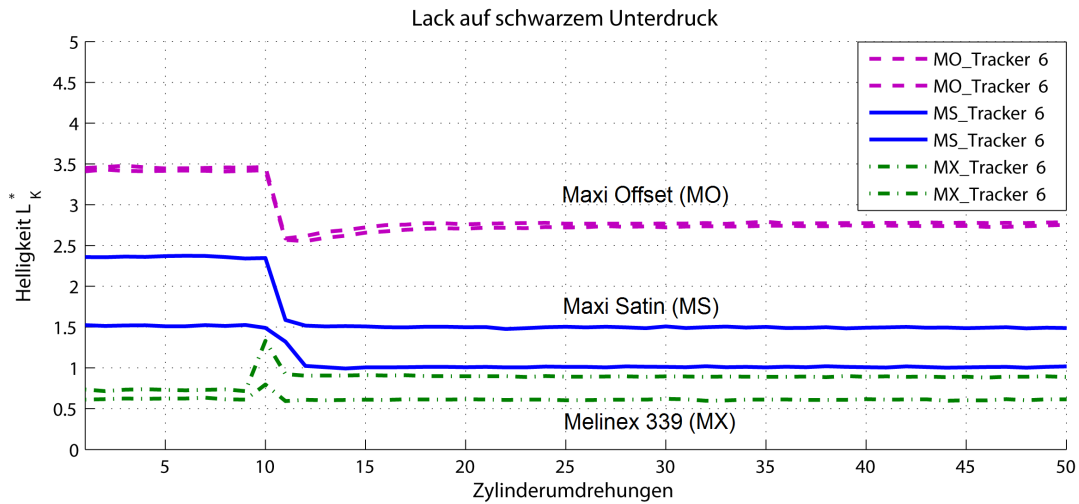
## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN



**Abbildung 6.18:** Der Lack *FLHF00001* von *SunChemical* wird nach 10 Zylinderumdrehungen einmalig auf den Bedruckstoff gedruckt (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ). Dargestellt ist die Helligkeit  $L_K^*$  über die Zylinderumdrehungen des Trackers 5 (Bedruckstoffweiß). Die Änderungen in von  $L_K^*$  sind abhängig vom Bedruckstoff. Die beiden Linien für jeden Bedruckstoff stellen jeweils die Messwerte für je einen Druckversuch mit denselben Versuchseinstellungen dar. Die Abweichungen sind bei den eventuell unterschiedlichen einzelnen Substratbogen und der Übertragung nicht reproduzierbarer Lackmengen von Versuch zu Versuch zu suchen. Durch den Lackauftrag sinken die Helligkeiten  $L_K^*$  ungefähr um 1 bis 2.

Es ist ersichtlich, dass sich die Helligkeit  $L_K^*$  abhängig vom Bedruckstoff ändert. Beim Aufdruck auf die weiße *Melinex 339*-Folie (MX) hat der Lack kaum Auswirkungen auf die Helligkeit. Die größten Änderungen von  $L_K^*$  treten bei den Papieren auf. Da diese durch den Dispersionslack glänzender werden und damit einen größeren Teil des einfallenden Lichts gerichtet reflektieren, sinkt in beiden Fällen deren Helligkeit  $L_K^*$  um 1 bis 2. Interessant ist, dass das Papier *Maxi Offset* (MO) ohne schwarzen Unterdruck (vgl. Abbildung 6.18) sowie vor als auch nach dem Lackaufdruck am dunkelsten, mit schwarzem Unterdruck (vgl. Abbildung 6.19) am hellsten erscheint. Bei der weißen Folie (MX) ist es umgekehrt. In die Folie können die Lichtstrahlen der Beleuchtung aufgrund ihrer Opazität nicht so stark eindringen wie in die Papiere. Sie werden überwiegend reflektiert (mit gerichtetem und diffusem Anteil). Die Folie erscheint damit bei der Messung mit der Kamera heller als die Papiere, bei denen ein größerer Teil des Lichts in dieselben eindringt und dort absorbiert und gestreut wird [94]. Dieser Anteil ist bei dem matten Naturpapier *Maxi Offset* (MO) größer als bei dem matt gestrichenem Bilderdruckpapier *Maxi Satin* (MS). Auf dem schwarzen Unterdruck können die unterschiedlichen Helligkeiten durch die Rauheit der Substrate erklärt werden. Die schwarze UV-Farbe wirkt generell sehr glänzend. Beim Aufdruck auf die glatte Folie wird dadurch das Licht vorwiegend gerichtet reflektiert (wie in Abbildung 6.17a) und damit nicht von der Kamera detektiert. Bei raueren Oberflächen (siehe Abbildung 2.18) kann sich die Farbschicht nicht vollkommen eben ausbilden, es erfolgt eine zunehmend diffuse Reflexion (wie in Abbildung 6.17b), die von der Kamera erfasst wird. Ein eindeutiger weißer und schwarzer Farbeindruck bleibt mit und ohne





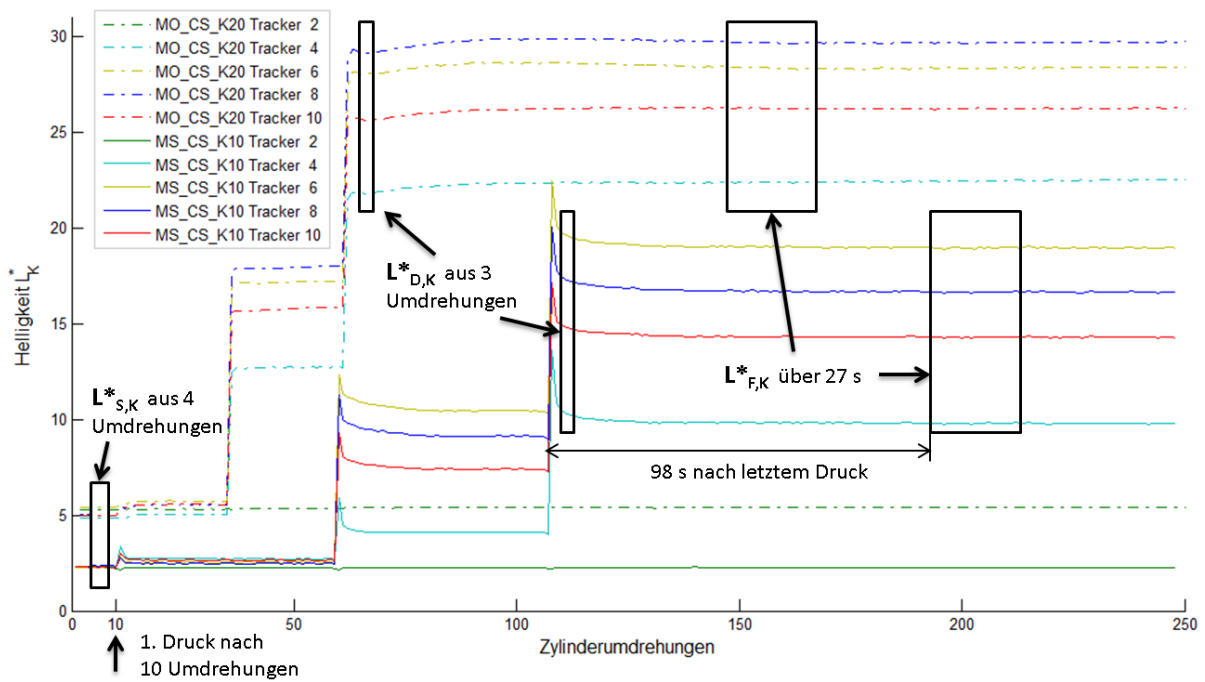
**Abbildung 6.19:** Der Lack *FLHF00001* von *SunChemical* wird nach 10 Zylinderumdrehungen einmalig auf den schwarzen Unterdruck gedruckt (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ). Dargestellt ist die Helligkeit  $L_K^*$  über die Zylinderumdrehungen des Trackers 6 (schwarzer Unterdruck). Die Änderungen in von  $L_K^*$  sind abhängig vom Bedruckstoff. Die beiden Linien für jeden Bedruckstoff stellen jeweils die Messwerte für je einen Druckversuch mit denselben Versuchseinstellungen dar. Die Abweichungen sind bei den eventuell unterschiedlichen einzelnen Substratbogen und der Übertragung nicht reproduzierbarer Lackmengen von Versuch zu Versuch zu suchen. Durch den Lackauftrag verändern sich die Helligkeiten  $L_K^*$  ungefähr um 0,5 bis -1. Auffällig ist der große Unterschied der Messkurven bei dem Bedruckstoff *Maxi Satin*.

Unterdruck in allen Fällen erhalten. Dieser ist zudem abhängig von der Breite des Blendenspalts (siehe Abbildung 6.13).

Um die Helligkeitsänderungen nach dem Aufdruck der Effektpigmentfarben zu untersuchen, wurden über 140 Druckversuche in dem beschriebenen Prüfstand durchgeführt und dabei mehr als 1400 Tracker beobachtet. Abbildung 6.20 zeigt beispielhaft den Verlauf der Helligkeit  $L_K^*$  der Tracker auf schwarzem Unterdruck über die Zylinderumdrehungen für zwei Mehrfachdruckversuche bei einer Druckgeschwindigkeit von  $26 \frac{m}{min}$ .

Aus den Helligkeitsverläufen werden die in Abbildung 6.20 eingezeichneten  $L_K^*$ -Werte ( $L_{S,K}^*$ ,  $L_{D,K}^*$  und  $L_{F,K}^*$ ) durch Mittelwertbildung, wie in Abbildung 6.20 beschrieben, berechnet. Es ist ersichtlich, dass sich der Verlauf der Kurven direkt nach dem Drucken abhängig vom Bedruckstoff unterscheidet. Die Helligkeit nach dem 1. Druckprozess (nach 10 Umdrehungen) unterscheidet sich nur gering gegenüber dem Wert  $L_{S,K}^*$  vor dem Drucken (vergleiche Abbildung 6.19), während bei mehrmaligem Übereinanderdruck sich die Helligkeit stark erhöht. Da aufgrund der Dynamik beim Druckprozess davon abgesehen wurde (siehe Abbildung 6.15), den ersten Messwert nach dem Drucken zu verwenden, wird der Wert  $L_{D,K}^*$  aus denen der Umdrehungen 2, 3 und 4 nach dem letzten Druckprozess gemittelt. Eine Mittelung erfolgt, um ein mögliches Rauschen kompensieren zu können. Umorientierungen der Pigmente im Kurzzeitbereich ( $< 1$  Zylinderumdrehung) nach dem Druckprozess werden somit nicht erfasst. Der Wert  $L_{F,K}^*$  wird

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN



**Abbildung 6.20:** Helligkeit  $L_K^*$  der Tracker auf schwarzem Unterdruck aufgetragen über die Zylinderumdrehungen (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ). Es sind die unterschiedlichen Kurvenverläufe der Tracker 2, 4, 6, 8 und 10 erkennbar (vergleiche Abbildung 6.4). Die Tracker entstammen zwei Druckversuchen (einer mit 20%iger *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmentkonzentration auf *Maxi Offset*, der andere mit 10% Pigmentanteil auf *Maxi Satin*). Eingezeichnet sind Rechtecke, die den Mittelungsbereichen der aus dem Verlauf generierten  $L_K^*$ -Werte entsprechen (S  $\hat{=}$  Substrat, D  $\hat{=}$  Druck, F  $\hat{=}$  Farbe).  $L_{F,K}^*$  wird immer 98 s nach dem letzten Abdruck aus dem Mittelwert der Umdrehungen gebildet, die innerhalb von 27 s stattfinden.

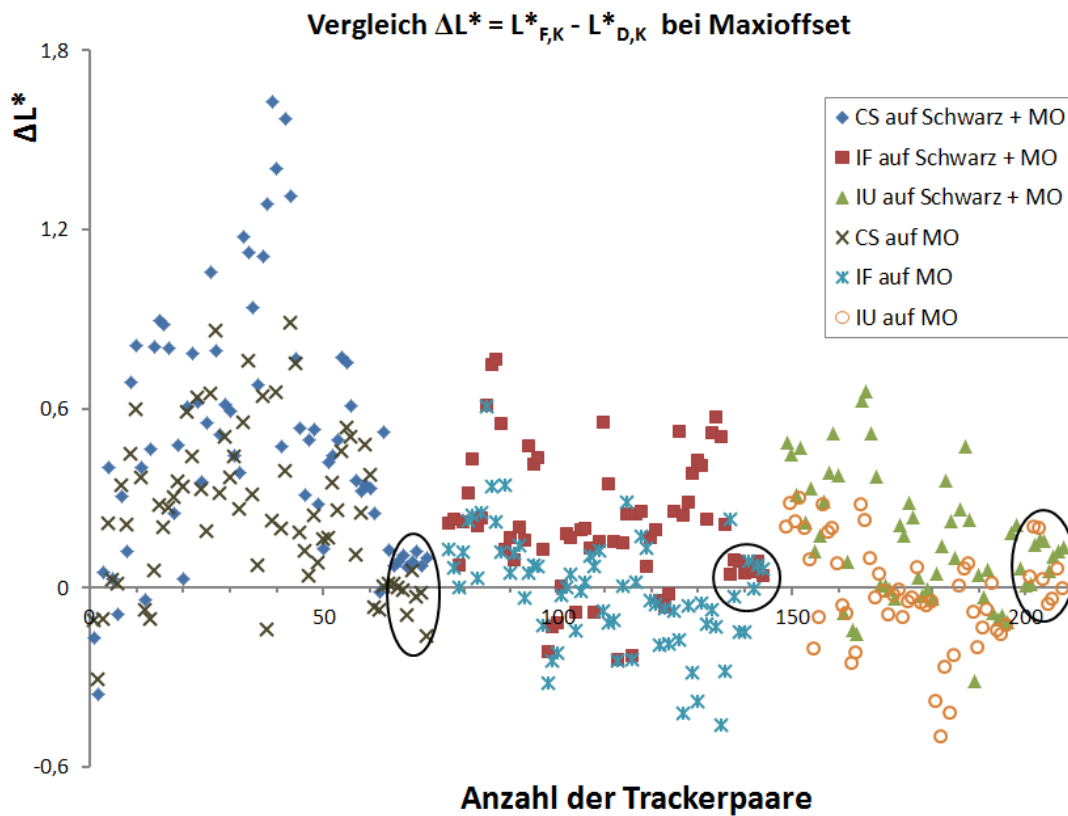
für jeden Tracker aus den Messdaten der Umdrehungen gemittelt, die in einem Zeitintervall von 27 s genau 98 s nach dem letzten Drucken generiert wurden. Letztere Zeit ergibt sich aus der Dauer der Datenaufzeichnungen. Da mit längerer Messdauer keine weiteren Veränderungen der Messdaten festgestellt wurde, beschränkte sich die Aufnahmezeit auf ca. 5,5 Minuten. Ein konstanter zeitlicher Abstand zwischen den den Werten der Helligkeit am Ende der Aufzeichnungen ( $L^*_{F,K}$ ) und direkt nach dem Drucken ( $L^*_{D,K}$ ) ist notwendig, um die Vergleichbarkeit der Daten bei unterschiedlichen Druckgeschwindigkeiten gewährleisten zu können (siehe Abbildung 6.20). Abhängig von der Druckgeschwindigkeit und vom Maschinenbediener finden die Druckstellen nach unterschiedlich vielen Umdrehungen statt. Das Intervall von 98 s wurde dabei so gewählt, dass der  $L^*_{F,K}$ -Wert für alle Versuche aus den Aufzeichnungen berechnet werden kann und dieses trotzdem möglichst lang vom letzten Druckprozess entfernt liegt. Die Helligkeitskurven der zu diesen beiden Versuchen gehörenden Tracker auf Bedruckstoff ohne Unterdruck befindet sich im Anhang C (Abbildung C.3).

Zur Untersuchung der Pigmentorientierung wird die Differenz  $\Delta L^*$  nach Gleichung 6.1 aus den Werten der Helligkeit relativ am Ende der Aufzeichnungen ( $L^*_{F,K}$ ) und direkt nach dem Drucken ( $L^*_{D,K}$ ) gebildet. Die Differenzen der Werte aller Tracker, ausgenommen die der Tracker auf Bedruckstoffweiß und schwarzem Unterdruck (1 und 2), sind in den Abbildungen 6.21, 6.22 und 6.23 für jedes Substrat getrennt dargestellt. Als Trackerpaar wird dabei ein ungeradzahliges Tracker auf Bedruckstoffweiß und der darauffolgende geradzahlige Tracker auf schwarzem Unterdruck bezeichnet, deren Werte aus den Daten derselben Pixel des Kamerasensors berechnet werden (siehe Abbildung 6.4). Die  $\Delta L^*$ -Werte eines Trackerpaars werden an derselben Stelle der Abszisse durch zwei Messpunkte dargestellt.

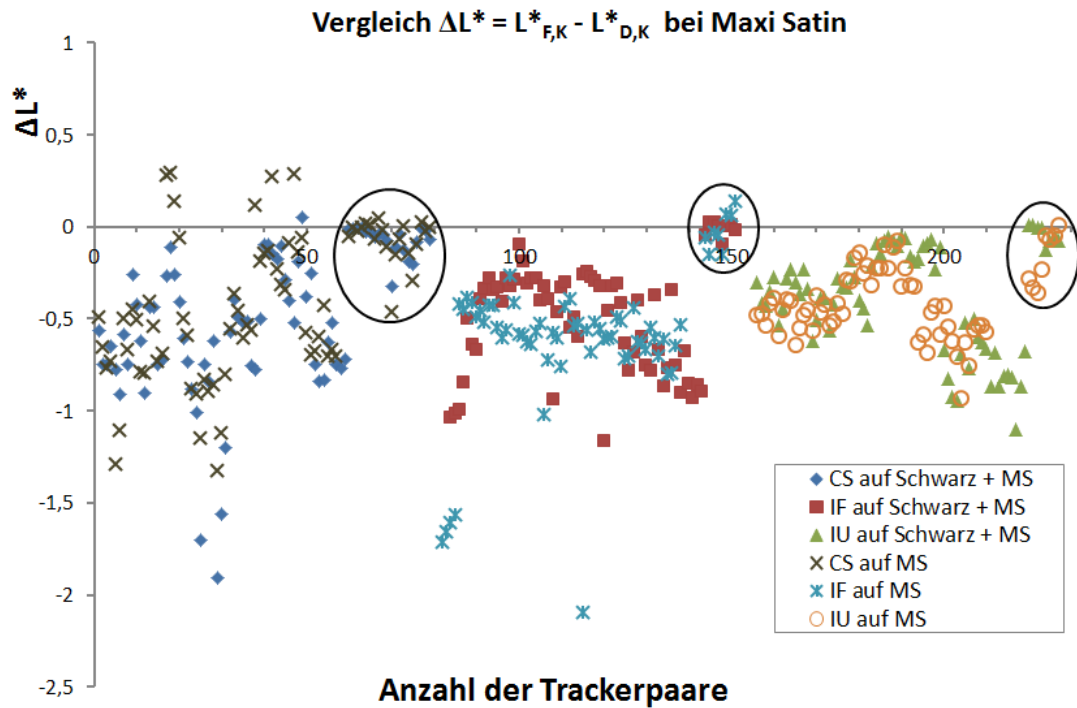
$$\Delta L^* = L^*_{F,K} - L^*_{D,K} \quad (6.1)$$

In Abbildung 6.21 befinden sich fast alle  $\Delta L^*$ -Werte innerhalb des Bereichs von  $[-0,5 \dots 1]$ . Die *Colorstream® Arctic Fire* Farben weisen teilweise etwas höhere Werte auf. Der Schwerpunkt der Messpunkte liegt insgesamt im positiven Wertebereich, wenngleich sich hauptsächlich bei den *Iriodinen®* die Werte der Tracker auf Bedruckstoffweiß näher an der Abszisse befinden. Eingekreist sind die Werte aus den Versuchen mit einmaligem Aufdruck. Hier sind die Helligkeitsänderungen äußerst gering, was auch daran liegt, dass alle Einfachdrucke bei einem Blendenspalt von 1 mm aufgenommen wurden. Da sich die Werte insgesamt im Bereich derer befinden, die allein der wasserbasierte Lack auf den Bedruckstoff ausübt (siehe Abbildungen 6.19 und 6.18), der wiederum teilweise verdunstet, können sie nicht einer mittelfristigen Umorientierung der Pigmente nach dem Druckspalt zugeordnet werden.

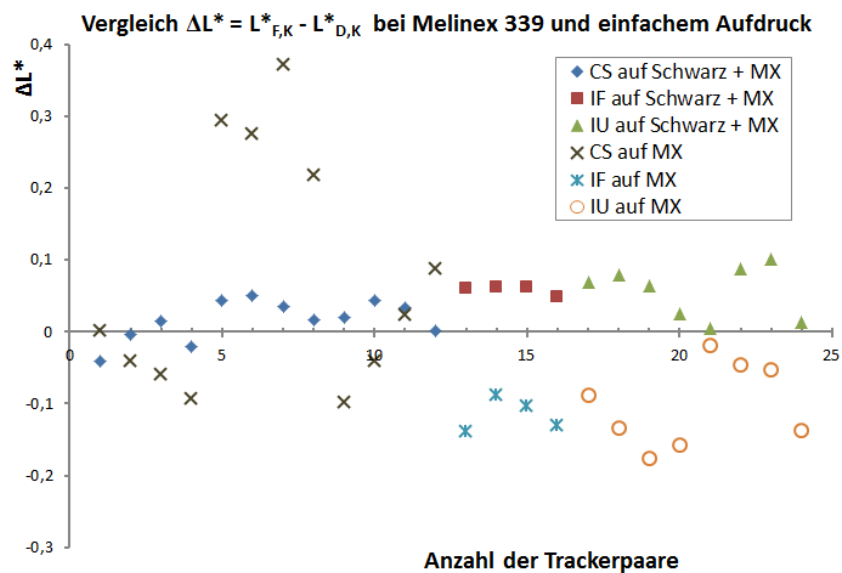
Bei *Maxi Satin* (Abbildung 6.22) liegen die Helligkeitsänderungen mehrheitlich im negativen Bereich, was bedeutet, dass die Helligkeit nach dem letzten Aufdruck etwas größer ist als etwa zwei Minuten später. Dies ist ebenfalls aus Abbildung 6.20 ablesbar und lässt eine ebenere Pigmentorientierung über die Zeit



**Abbildung 6.21:** Helligkeitsänderung zwischen  $L^*_{F,K}$  und  $L^*_{D,K}$  bei *Maxi Offset* als Bedruckstoff. Aufgetragen sind die Helligkeitsänderungen  $\Delta L^*$  über die Anzahl der Trackerpaare (Tracker auf Bedruckstoffweiß + Tracker auf schwarzem Unterdruck bilden ein Trackerpaar). Auf der Abszisse sind nacheinander die Werte der Versuche mit *Colorstream® Arctic Fire* (CS), *Iriodin® Rutil Feinrot* (IF) und *Iriodin® Ultra Rot* (IU) Pigmenten aufgetragen (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ). Eingekreist sind die Werte mit einmaligem Aufdruck.



**Abbildung 6.22:** Helligkeitsänderung zwischen  $L^*_{F,K}$  und  $L^*_{D,K}$  bei *Maxi Satin* als Bedruckstoff. Aufgetragen sind die Helligkeitsänderungen  $\Delta L^*$  über die Anzahl der Trackerpaare (Tracker auf Bedruckstoffweiß + Tracker auf schwarzem Unterdruck bilden ein Trackerpaar) bei einer Druckgeschwindigkeit von  $26 \frac{m}{min}$ . Eingekreist sind die Werte mit einmaligem Aufdruck.



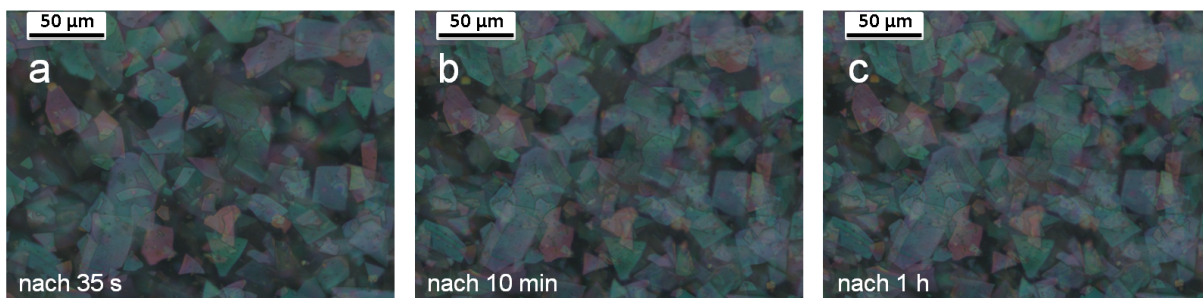
**Abbildung 6.23:** Helligkeitsänderung zwischen  $L^*_{F,K}$  und  $L^*_{D,K}$  bei der weißen Folie *Melinex 339* als Bedruckstoff. Aufgetragen sind die Helligkeitsänderungen  $\Delta L^*$  über die Anzahl der Trackerpaare (Tracker auf Bedruckstoffweiß + Tracker auf schwarzem Unterdruck bilden ein Trackerpaar).

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

vermuten. Eingekreist sind die Werte bei einmaligem Aufdruck, die sich wieder sehr nah an der Abszisse befinden. Da die  $\Delta L^*$ -Werte auch hier relativ klein sind, kann damit keine Umorientierung der Pigmente nachgewiesen werden. Im Vergleich zu *Maxi Offset* verhalten sich die Änderungen auf schwarzem Unterdruck und direkt auf dem Substrat bei *Maxi Satin* ähnlicher, was auf die geschlosseneren und glattere Oberfläche des matt gestrichenen Papiers zurückzuführen ist.

Die Helligkeitsänderungen der Tracker auf der Folie (siehe Abbildung 6.23) sind wie bei allen Einfachdruckproben äußerst gering und erlauben dadurch kaum Interpretationen.

Um eine Veränderung der Pigmentorientierung beobachten zu können, wird zum Vergleich eine mit einer Handwalze aufgebrachte Effektpigmentschicht (10%ige *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Effektfarbe auf *Maxi Satin* und schwarzem Unterdruck) nach unterschiedlichen Zeiten nach dem Aufwalzen im Mikroskop betrachtet. Einige aufgenommene Bilder sind in Abbildung 6.24 dargestellt. Es ist erkenntlich, dass sich die

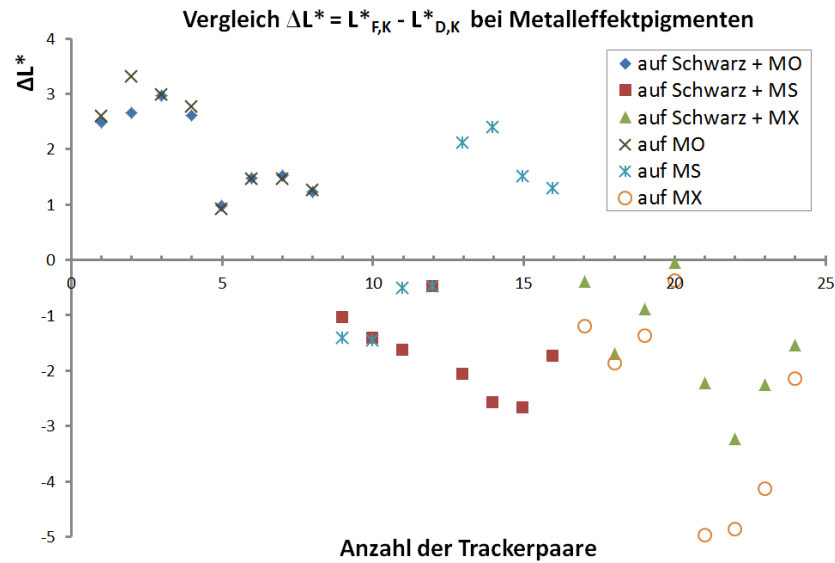


**Abbildung 6.24:** Mikroskopaufnahmen (50-fache Vergrößerung, Aufsicht-Hellfeldbeleuchtung) einer auf *Maxi Satin* und schwarzem Unterdruck aufgewalzten Effektfarbschicht (10% *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* Pigmentanteil)

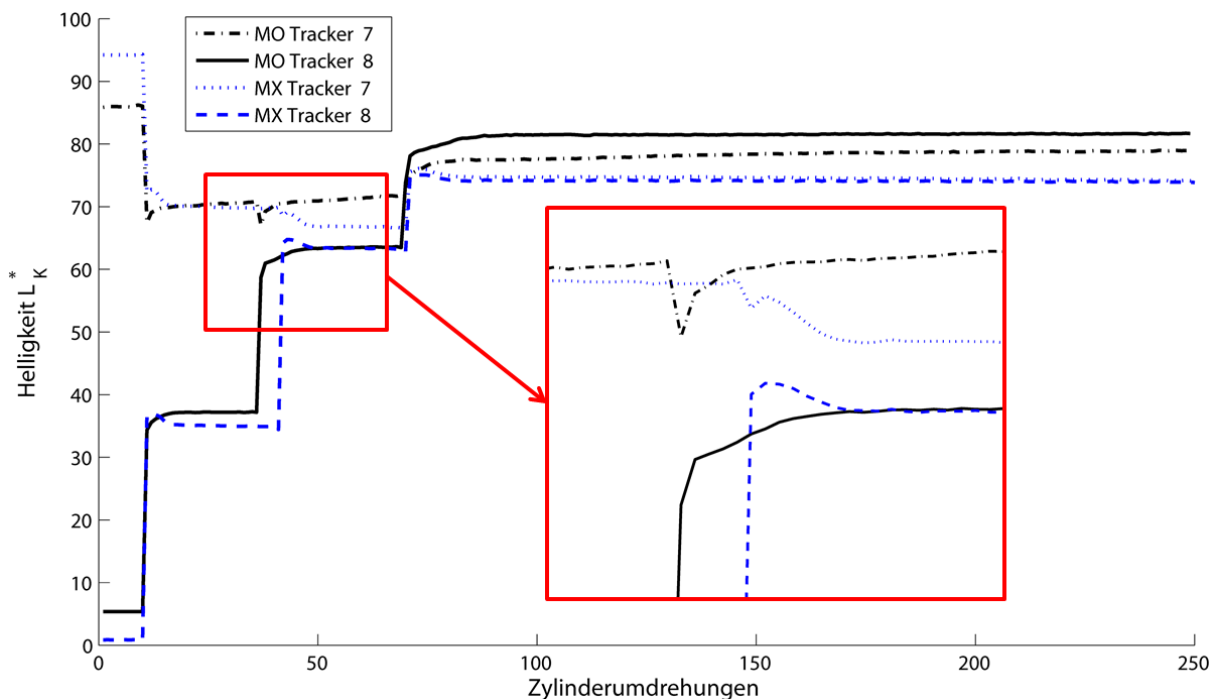
Orientierung der Pigmente in dem Zeitraum zwischen 35 Sekunden und einer Stunde nach dem Aufwalzen trotz einer dickeren Farbschicht als beim Drucken nicht merkbar ändert. Dies bestätigt die bisherigen Ergebnisse, die durch die geringen Helligkeitsänderungen aus den Druckversuchen gewonnen wurden.

Weiterhin werden die Helligkeitsdifferenzen der Interferenzeffektfarben mit einer Metalleffektfarbe verglichen. Abbildung 6.25 zeigt die Helligkeitsänderungen der Metalleffektfarbe *UltraStar aqua FP-4200 Silber* von *Eckart* bei unterschiedlichen Bedruckstoffen. In Abbildung 6.26 sind die Kurvenverläufe der Tracker 7 und 8 (vergleiche Abbildung 6.4) zweier Druckversuche über die Anzahl der Zylinderumdrehungen aufgetragen (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ).

Aus der Abbildung 6.25 ist ersichtlich, dass die Helligkeitsänderungen bei der Metalleffektfarbe größer sind als bei den Interferenzeffektfarben. Dies kann unter anderem auf den höheren Reflexionsgrad der Metallpigmente zurückgeführt werden. Änderungen der Pigmentorientierung können somit besser von der Kamera detektiert werden. Bei *Maxi Offset* besteht ein eindeutiger Trend hin zu steigenden  $\Delta L^*$ -Werten (zunehmend ungeordnete Pigmente), bei *Melindex 339* hin zu sinkenden  $\Delta L^*$ -Werten (zunehmend parallel



**Abbildung 6.25:** Helligkeitsänderung zwischen  $L^*_{F,K}$  und  $L^*_{D,K}$  bei der Metalleffektfarbe *UltraStar aqua FP-4200 Silber* von *Eckart* auf unterschiedlichen Bedruckstoffen (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ). Aufgetragen sind die Helligkeitsänderungen  $\Delta L^*$  über der Anzahl der Trackerpaare (Tracker auf Bedruckstoffweiß + Tracker auf schwarzem Unterdruck). Sie sind im Vergleich zu den Interferenzeffektfarben besonders groß.



**Abbildung 6.26:** Verlauf von  $L^*_K$  bei den Trackern 7 und 8 der Metalleffektfarbe *UltraStar aqua FP-4200 Silber* von *Eckart* auf den Bedruckstoffen *Maxi Offset* (MO) und *Melindex 339* (MX). Aufgetragen sind die  $L^*_K$ -Werte bei einer Druckgeschwindigkeit von  $26 \frac{m}{min}$  über die Zylinderumdrehungen. Vergrößert sind die Kurvenverläufe nach dem jeweils 2. Aufdruck abgebildet.

orientierte Pigmente). Bei *Maxi Satin* tritt mehrheitlich der letzte Fall auf. Die Verläufe der  $L^*_K$ -Werte einiger Tracker sind in Abbildung 6.26 dargestellt. Bei den Trackern auf schwarzem Untergrund (8) ist ein deutliches Ansteigen der Helligkeit bei jedem Aufdruck erkennbar. Der erreichte Helligkeitswert ist am Ende zwischen zwei- und dreimal so hoch wie bei den Interferenzeffektfarben. Vergrößert ist das Verhalten nach dem jeweils 2. Druck dargestellt. Es ist erkenntlich, dass bei *Maxi Offset* die Helligkeit nach dem Druckprozess ansteigt, während sie bei der Folie sinkt. Dieses Phänomen wird ebenfalls aus Abbildung 6.25 deutlich und ist sicherlich auf den Bedruckstoff zurückzuführen. Inwieweit die Änderungen der Messwerte jedoch auf eine Umorientierung der Lage der Pigmente oder auf ein Wegschlagen des Bindemittels in den Bedruckstoff (bei den Papieren) oder beides zurückzuführen ist, bleibt offen. Der Verlauf der Tracker 7 lässt sich nur schwer interpretieren (vergleiche Abbildung C.3 im Anhang C). Nach dem ersten Aufdruck sinkt die Helligkeit aufgrund der stark (gerichtet) reflektierenden Pigmente, nach dem 2. Druck findet nur eine geringe Änderung statt. Vermutlich ist die Oberfläche bereits vollständig mit den Metallpigmenten bedeckt. Nach dem 3. Druck steigt die Helligkeit aufgrund zunehmender Streureflexion, die aus Mehrfachreflexionen zwischen den Metallpigmenten entsteht, wieder etwas an und erreicht ein ähnliches Endniveau wie die der Tracker auf schwarzem Unterdruck (8).

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass in einem Zeitintervall zwischen 0,5 bzw. 1,5 Sekunden und 2 Minuten keine Umorientierung der Effektpigmente mit einer Kamera eines Druckinspektionssystems nachgewiesen werden konnte. Eine Betrachtung einer Effektpigmentschicht im Mikroskop bestätigt dieses Ergebnis auch über einen längeren Zeitraum hinaus. Die relativ geringen Änderungen der gemessenen Helligkeiten können überwiegend auf die Art des Substrats zurückgeführt werden. Dabei zeigte sich bei den Papieren bei glatter Oberfläche ein Trend hin zu steigenden, bei rauer Oberfläche hin zu sinkenden Helligkeiten nach dem Aufdruck. Unterschiede bei den verschiedenen Interferenzeffektfarben sind nur teilweise erkennbar. Bei der industriellen Produktion finden normalerweise keine Übereinanderdrucke von Effektpigmentfarben statt. Wird berücksichtigt, dass trotz eines mehrmaligen Aufdrucks keine großen Helligkeitsänderungen mit der Kamera des Druckinspektionssystems gemessen werden konnten, so muss festgehalten werden, dass sich diese Methode nicht zur Eruiierung einer Pigmentumorientierung bei Interferenzeffektfarben eignet. Es wurde weiterhin gezeigt, dass sich die Helligkeitskurven bei einer Metalleffektfarbe generell anders verhalten als bei den Interferenzeffektpigmenten, was vermutlich auf deren hohen Reflexionsfaktor zurückgeführt werden kann.

### 6.3 Überprüfung der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle

Da Druckinspektionssysteme standardmäßig in Druckmaschinen zur Fehlererkennung eingesetzt werden, ist ein weiteres Ziel dieses Kapitels, das vorhandene Druckinspektionssystem ebenfalls zur Prozesskontrolle



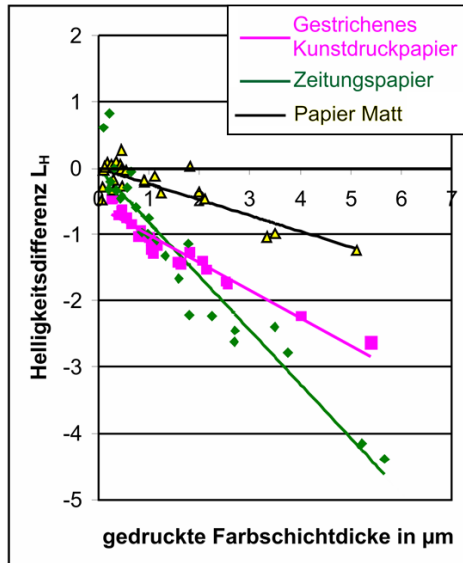
### 6.3 Überprüfung der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle

gedruckter Effektpigmentschichten zu verwenden.

Als Messgröße zur Kontrolle gedruckter Effektpigmentschichten hat *Hupp* in ihrer Dissertation [15] den Helligkeitswert  $L_H$  eingeführt, der sich abhängig von der Pigmentart und vom Bedruckstoff nahezu linear mit der gedruckten Schichtdicke der Effektfarbe ändert. Der patentierte [2] Helligkeitswert  $L_H$  wird aus der Differenz der Helligkeiten der gedruckten Effektfarbschicht ( $L_F^*$ ) und der des Substrats ( $L_S^*$ ) bei einem Beleuchtungswinkel von  $45^\circ$  und einem Beobachtungswinkel von  $90^\circ$  im CIELAB-Farbraum nach Gleichung 6.2 berechnet:

$$L_H = L_F^* - L_S^* \quad (6.2)$$

*Hupp* beschränkte sich bei ihren Versuchen auf Druckproben, die mit Interferenzeffektpigmenten der 1. Generation (z.B. *Iridine*®) in Probedruckgeräten oder durch ein Stufenraket hergestellt wurden. Die Messung der  $L^*$ -Werte erfolgte mit verschiedenen Messgeräten, die der Effektfarbschichtdicken gravimetrisch. Abbildung 6.27 zeigt die annähernd lineare Änderung des Helligkeitswerts  $L_H$  über die Schichtdicke bei unterschiedlichen Bedruckstoffen.



**Abbildung 6.27:** Interferenzeffektpigment *LithoBlue* von *Merck* auf unterschiedlichen Bedruckstoffen. Aufgetragen ist die Helligkeitsdifferenz  $L_H$  über die gedruckte Schichtdicke (Messgerät *SpectroDens Premium* von *Techkon*)[15]

Während für Schichtdicken bis zu  $6\,\mu\text{m}$  ein linearer Verlauf von  $L_H$  nachgewiesen werden konnte, konvergierte  $L_H$  bei aufgerakelten Effektpigmentschichten ab  $30\,\mu\text{m}$ .

Die Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel des hier beschriebenen Prüfstandes sind dieselben, die zur  $L_H$ -Wert Messung benötigt werden und entsprechen zudem der Messgeometrie  $45^\circ/90^\circ$ , die zur Color-Shift Messung verwendet wird (siehe Abbildungen 6.13 und 3.2). Deshalb ist es das Ziel dieses Abschnitts,

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

---

zu untersuchen, ob sich der aus den RGB-Daten des kamerabasierten Druckinspektionssystems berechnete  $L_{H,K}$ -Wert zur Inline-Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben für industrielle Druckmaschinen eignet. Dazu wird die Gültigkeit von Gleichung 6.2 sowohl für Effektpigmente der 1. Generation als auch für eines der 2. Generation (*Colorstream® Arctic Fire Pigment*) überprüft.

Die Berechnung der  $L_{H,K}$ -Werte erfolgt aus den kamerabasierten Messungen nach Gleichung 6.3 (vergleiche Abbildung 6.20).

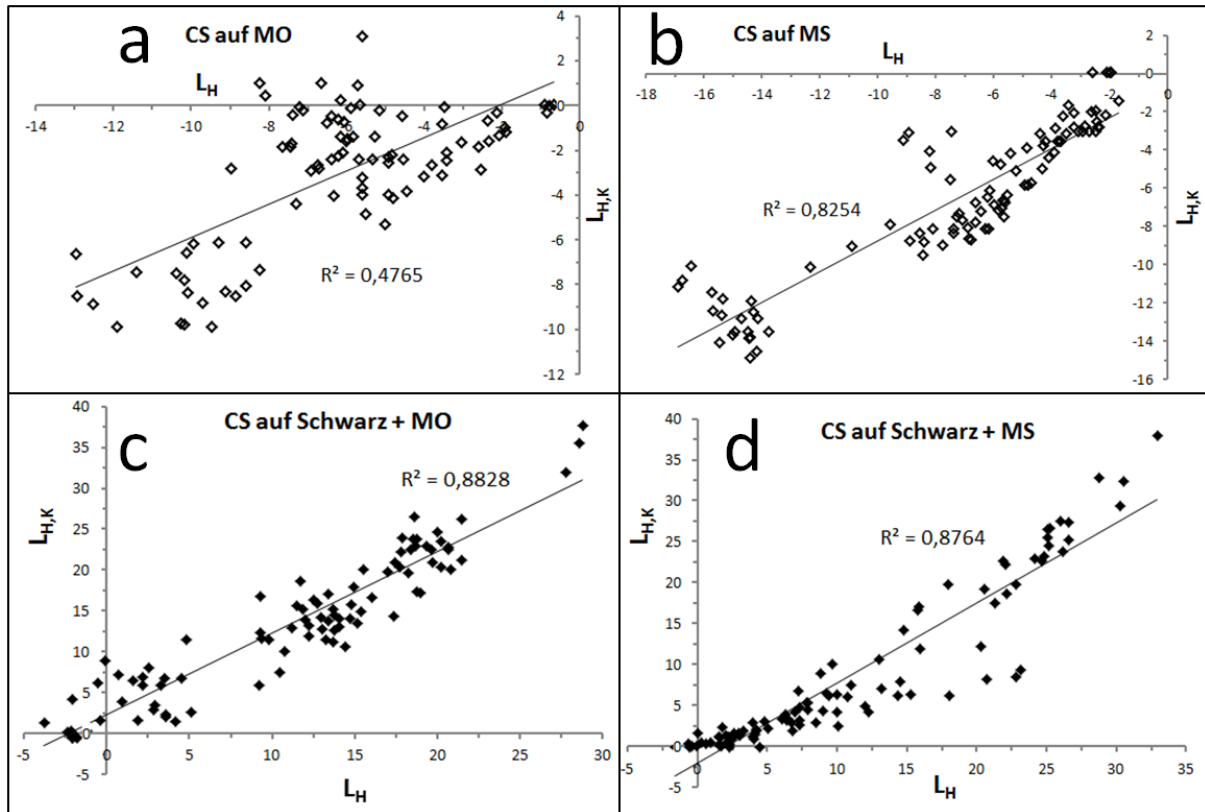
$$L_{H,K} = L^*_{F,K} - L^*_{S,K} \quad (6.3)$$

Diese werden mit den  $L_H$ -Werten, die aus den mit dem Mehrwinkelspektralfotometer *MA98* gemessenen  $L^*$ -Werten berechnet wurden, verglichen. Dafür werden alle Trackerstellen der Druckproben nach vollständiger Trocknung der gedruckten Schicht vermessen. Als Bedruckstoffreferenzen ( $L^*_S$ -Werte) mit und ohne schwarzen Unterdruck dienen die Trackerstellen 2 und 1. Es sei darauf hingewiesen, dass das Messfeld des *MA98* größer ist als die Fläche eines Trackers (siehe Abbildungen 5.13 und 6.4).

In Abbildung 6.28 sind die nach Gleichung 6.2 mit dem *MA98* gemessenen  $L_H$ -Werte über die mit der Kamera inline nach Gleichung 6.3 gemessenen  $L_{H,K}$ -Werte für die *Colorstream® Arctic Fire* Effektpigmentproben aufgetragen.

Es erfolgt zudem eine Unterscheidung, ob auf schwarzem Unterdruck (c und d) gedruckt wurde oder nicht (a und b). Erwartungsgemäß bewegen sich die Helligkeitsdifferenzen dementsprechend im 1. oder 3. Quadrant des Koordinatensystems. Es ist aus den Regressionsgeraden und angegebenen Bestimmtheitsmaßen  $R^2$  ersichtlich, dass alle Werte bis auf Abbildung 6.28a recht gut korrelieren, wenngleich teilweise große Abweichungen auftreten. Die  $L_{H,K}$ -Werte der Druckversuche mit der höheren Druckgeschwindigkeit  $74 \frac{m}{min}$  wurden dabei mit dem Faktor zwei multipliziert, um die von  $160 \mu s$  auf  $80 \mu s$  verkürzte Belichtungszeit auszugleichen. Eine Linearität der Kamera wurde in Kapitel 6.1.1 bereits nachgewiesen. Die entsprechenden Grafiken für die *Iriodine®* befinden sich im Anhang C (Abbildungen C.4 und C.5). Auf eine Darstellung der Helligkeitsdifferenzen bei der Folie wird aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen verzichtet. In Tabelle 6.2 sind die Bestimmtheitsmaße aller Pigmente zusammengetragen. Es kann festgestellt werden, dass die Helligkeitsdifferenzen mit schwarzem Untergrund besser korrelieren als ohne, wenngleich das bei Effektfarben mit *Iriodin® Ultra Rot* auf *Maxi Satin* und schwarzem Unterdruck nicht der Fall ist. Generell sind die Bestimmtheitsmaße bei *Maxi Satin* höher als bei *Maxi Offset*. Die teilweise stark streuenden Helligkeitsdifferenzen können unter anderem auf die ungleichmäßige Beleuchtung über die Druckbreite zurückgeführt werden. Gelingt es, eine über die Druckbreite konstante Beleuchtung zu erreichen, so eignen sich Druckinspektionssysteme durchaus zur Prozesskontrolle durch die Helligkeitsdifferenzen  $L_{H,K}$ . Zudem ändern sich, wie in Kapitel 6.2 gezeigt, die Helligkeiten  $L^*_K$  der Effektfarbschichten wenige Sekunden nach dem Aufdruck kaum mehr. Da die Bestimmtheitsmaße bis auf

### 6.3 Überprüfung der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle



**Abbildung 6.28:** Vergleich der mit dem *MA98* gemessenen  $L_H$ -Werte mit den aus den Kameradaten berechneten  $L_{H,K}$ -Werten bei *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* (CS) Effektpigmentfarben auf den Bedruckstoffen *Maxi Offset* (MO) und *Maxi Satin* (MS) ohne (a und b) und mit (c und d) schwarzem Unterdruck. Aufgetragen sind die  $L_{H,K}$ -Werte über die  $L_H$ -Werte. Dargestellt sind die Geraden der linearen Regressionen der Messwerte zusammen mit ihren Bestimmtheitsmaßen  $R^2$ .

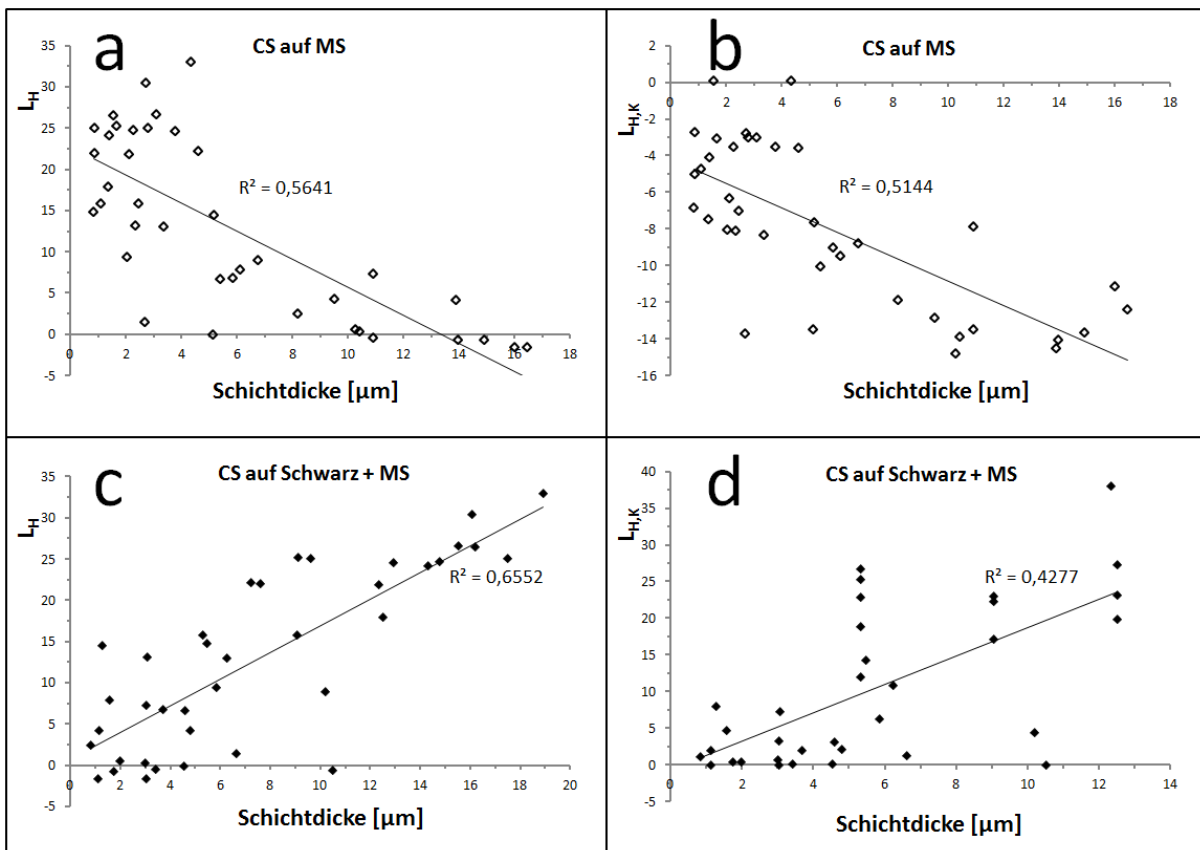
**Tabelle 6.2:** Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der linearen Regressionen aus der Gegenüberstellung der  $L_H$  und  $L_{H,K}$ -Werte in den Abbildungen 6.28, C.4 und C.5. Es werden Druckversuche mit verschiedenen Effektpigmenten auf den Bedruckstoffen *Maxi Offset* und *Maxi Satin* mit oder ohne schwarzen Unterdruck betrachtet.

Bestimmtheitsmaß $R^2$	auf	<i>Maxi Offset</i>	<i>Maxi Satin</i>
<i>Colorstream</i> <sup>®</sup> <i>Arctic Fire</i>	Weiß	0,48	0,83
	Schwarz	0,88	0,88
<i>Iriodin</i> <sup>®</sup> <i>Rutil Feinrot</i>	Weiß	0,62	0,74
	Schwarz	0,85	0,87
<i>Iriodin</i> <sup>®</sup> <i>Ultra Rot</i>	Weiß	0,62	0,90
	Schwarz	0,61	0,52

## 6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN

eine Ausnahme bei den *Colorstream*<sup>®</sup>Pigmenten hoch sind, kann die Helligkeitsdifferenz  $L_{H,K}$  nahezu äquivalent zu  $L_H$  mit der Kamera eines Druckinspektionssystems gemessen werden.

Als Nächstes wird untersucht, ob sich die Schichtdicke der gedruckten Interferenzeffektfarben wie bei *Hupp* linear mit der Helligkeitsdifferenz ändert. Zur Schichtdickenmessung wird die in Kapitel 3.2.4 beschriebene Messmethode gewählt, die durchaus fehlerbehaftet ist, aber dennoch den Umständen entsprechend (Messung auf Papier, Quetschränder durch Flexodruck) gute Ergebnisse liefert. In Abbildung 6.29 sind die Helligkeitsdifferenzen  $L_H$  und  $L_{H,K}$  über die mit dem *PLu neox - 3D Optical Profiler* von *Sensorfar* [109] gemessenen Schichtdicken für *Colorstream*<sup>®</sup>*Arctic Fire* Effektfarben auf dem Bedruckstoff *Maxi Satin* mit (c und d) oder ohne (a und b) schwarzen Unterdruck aufgetragen. Die dementsprechenden Werte für *Iriodin*<sup>®</sup> *Rutil Feinrot* Effektfarben befinden sich im Anhang C (Abbildung C.6). Da es aufgrund der hohen Papierrauheit nicht möglich war, die gedruckten Schichtdicken auf dem Naturpapier *Maxi Offset* zu messen, beschränken sich die Messungen auf *Maxi Satin*.



**Abbildung 6.29:** Helligkeitsdifferenzen  $L_H$  (a und c) und  $L_{H,K}$  (b und d) aufgetragen über gemessene Schichtdicke für *Colorstream*<sup>®</sup>*Arctic Fire* (CS) Effektfarben auf dem Bedruckstoff *Maxi Satin* (MS) mit (c und d) oder ohne (a und b) schwarzen Unterdruck. Zusätzlich angegeben sind die Geraden der linearen Regressionen zusammen mit ihren Bestimmtheitsmaßen  $R^2$ .

### 6.3 Überprüfung der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle

Aus Abbildung 6.29 und den in der Tabelle 6.3 angegebenen Bestimmtheitsmaßen der linearen Regressionen  $R^2$  ist ersichtlich, dass die gemessenen Helligkeitsdifferenzen sich kaum linear zu den gemessenen Schichtdicken ändern. Die Ergebnisse mit *Colorstream® Arctic Fire* sind dabei deutlich besser als die mit

**Tabelle 6.3:** Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der linearen Regressionen aus der Gegenüberstellung der beiden Helligkeitsdifferenzen  $L_H$  und  $L_{H,K}$  und den gemessenen Schichtdicken (siehe Abbildungen 6.29 und C.6). Es werden Druckversuche mit verschiedenen Effektpigmenten auf dem Bedruckstoff *Maxi Satin* mit oder ohne schwarzen Unterdruck betrachtet.

Bestimmtheitsmaß $R^2$	auf <i>Maxi Satin</i>	$L_H$	$L_{H,K}$
<i>Colorstream® Arctic Fire</i>	Weiß	0,56	0,51
	Schwarz	0,66	0,43
<i>Iriodin® Rutil Feinrot</i>	Weiß	0,08	0,25
	Schwarz	0,05	0,12

*Iriodin® Rutil Feinrot* Effektfarben. Letztere lassen keine Interpretationen zu. Die Korrelationen sind insgesamt nicht gut, da sich die Streuungen der Schichtdickenmessung mit denen der Helligkeitsmessungen addieren. Die Messunsicherheiten der Kamera sind teilweise auf die ungleichmäßige Beleuchtung über die Druckbreite zurückzuführen. Es wird vermutet, dass die großen Abweichungen zu den von *Hupp* erkannten Zusammenhängen hauptsächlich auf die Messunsicherheiten der Messgeräte und die je nach Messort stark variierenden Schichtdicken zurückzuführen sind. Wie in Kapitel 3.2.4 dargestellt, müssen, um eine Höhendifferenz zum Substrat darstellen zu können, die Proben am Rand gemessen werden. Dabei wird der beim Flexodruck kaum vermeidbare Quetschrand mitgemessen, der zudem bei mehrfachem Übereinanderdruck besonders dick ist. Daher ist es nicht ausgeschlossen, dass sich die reale Farbschichtdicke an den Stellen der Tracker stark von der am Rand gemessenen unterscheidet, was große Messunsicherheiten erklären würde.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den verwendeten Messmethoden durch die mit der Kamera gemessene Helligkeitsdifferenz  $L_{H,K}$  keine Prozesskontrolle bezüglich der gedruckten Schichtdicken der Effektfarben erfolgen kann. Eine Messung von  $L_{H,K}$  durch ein kamerabasiertes Druckinspektionssystem ist jedoch unter der Voraussetzung einer konstanten Beleuchtung über die Druckbreite durchaus zu empfehlen. Da die Korrelationen zu den gedruckten Schichtdicken mit den mit dem *MA98* gemessenen  $L_H$ -Werten nicht besser sind als die mit der Kamera gemessenen, wird angenommen, dass die Ursachen für die großen Abweichungen in der Methode der Schichtdickenmessung zu suchen sind.

Insgesamt zeigten sich beim Verdrucken von Interferenzeffektfarben für den Flexodruck in der umgebauten Offsetdruckmaschine erstaunlich homogenen Schichten. Dieses Ergebnis konnte auf industrielle Druckmaschinen übertragen werden. Dazu erfolgte eine Patentanmeldung.

## **6. KAMERABASIERTE MESSUNG VON GEDRUCKTEN EFFEKTPIGMENTEN**

---

## Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit ist zum einen dadurch motiviert, Potenziale industrieller Druckmaschinen beim Verdrucken von relativ teuren Interferenzeffektfarben zur Veredelung von Druckprodukten besser auszu-schöpfen, um maximale optische Effekte bei moderaten Materialkosten zu erreichen.

Die Untersuchungen beziehen sich dabei hauptsächlich auf das Flexodruckverfahren, das bei der Druck-veredelung eine große Rolle spielt, und das aus diesem Grund ebenfalls in Form eines Lackwerks in Bogenoffsetdruckmaschinen standardmäßig integriert ist. Aus den optischen Effekten der Pigmente wer-den in Kapitel 3 die Qualitätsmerkmale Color-Shift und Glanz beschrieben und ausgewählt, auf die hin die gedruckten Proben überprüft werden sollen, sowie deren messtechnische Erfassungsmethoden festge-legt. Die Eignung der Messmethoden kann durch visuelle Abmusterungsversuche bestätigt werden. Da Interferenzeffektfarben im Ausdruck zu Inhomogenitäten neigen, die unerwünscht sind, werden die ge-druckten Schichten zusätzlich bezüglich ihrer Homogenität durch eine visuelle Abmusterung bewertet. Eine davor untersuchte messtechnische Bewertungsmethode stellte sich als nicht zielführend heraus.

In einem nächsten Schritt wird in Kapitel 4 durch Vorversuche ein praktisches Basiswissen zum Verdrucken von Interferenzeffektfarben erarbeitet, das eine sinnvolle Planung einer Versuchsreihe mithilfe der Methoden der statistischen Versuchsplanung erlaubt.

Um ein möglichst großes Nutzen-Aufwand-Verhältnis bei den kostenintensiven Druckversuchen auf der industriellen Rollendruckmaschine *Gallus RCS330-HD* zu erreichen, werden in Kapitel 5 die Methoden der statistischen Versuchsplanung eingesetzt, um eine Versuchsreihe zu entwerfen, aus dessen Ergebnis-sen die Haupteinflussfaktoren auf die festgelegten Qualitätsparameter erkennbar werden. Dazu wird ein D-optimaler Versuchsplan, der es erlaubt verfahrenstechnische Einschränkungen bei den Versuchspara-metern einzubeziehen, auf der Basis eines linearen Regressionsmodells gewählt. Alle 495 Proben, die in 51 Druckversuchen mit verschiedenen Parametervariationen hergestellt wurden, werden mit zwei Mehrwin-kelspektalfotometern und einem Glanzmessgerät vermessen. Die Auswertung erfolgt durch eine Regressi-onsanalyse. Als Ergebnis stellte sich heraus, dass die Pigmentart und das theoretische Schöpfvolumen der

## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

---

Rasterwalze den größten Einfluss auf den Color-Shift haben, während die Trocknungseinstellungen diesen geringfügiger beeinflussen. Trotzdem verringern längere Zeiten, bis die gedruckten Effektpigmentschichten in den Trocknermodulen getrocknet werden, nach diesem Ergebnis den Color-Shift. Für den Glanz erwiesen sich die Pigmentkonzentration und der Bedruckstoff als Haupteinflussgrößen. Hohe Pigmentkonzentrationen bewirken einen geringeren Glanz, bereits ohne Aufdruck glänzendere Bedruckstoffe ebenfalls. Um eine hohe Homogenität der gedruckten Schicht zu erreichen, zeigten sich geringe Schöpfvolumina und höhere Druckgeschwindigkeiten als erfolgsversprechend. Durch eine Betrachtung der Materialkosten aller hergestellten Druckproben konnte dargestellt werden, dass auch bei geringer Kostenbelastung ein hoher Color-Shift und Glanz mit Interferenzeffektfarben erreicht werden kann. Zusammenfassend stellte sich die Materialwahl als weitaus wichtiger für die optischen Effekte heraus als die drucktechnischen Parameter. Um einen hohen Color-Shift und Glanz mit geringen Kosten und homogenen Schichten zu vereinen, können hochwertige Pigmente, ein glänzender Bedruckstoff, geringe Pigmentkonzentrationen, relativ hohe Druckgeschwindigkeiten und moderate Schöpfvolumina empfohlen werden.

Da sich bei den Versuchen gezeigt hatte, dass sich längere Verweilzeiten negativ auf den Color-Shift auswirken, wird vermutet, dass die Ursache dafür in einer zeitlich abhängigen Umorientierung der Pigmente nach dem Verdrucken liegt. Um dies zu untersuchen, wurden in über 140 Versuchen gedruckte Effektpigmentschichten inline mit einem kamerabasierten Druckinspektionssystem an je 10 Stellen vor bis mehrere Minuten nach dem Druckprozess vermessen. Aufgrund der Prüfstandkonfiguration können im Bezug zur Bedruckstoffoberfläche gerichtete Reflexionen nicht detektiert werden. Eine Umorientierung der Pigmente könnte folglich aus den Kameradaten nachvollzogen werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Lage der Pigmente in einem Zeitintervall zwischen 1,5 Sekunden und 2 Minuten nach dem Aufdruck nicht nachweisbar ändert. Die Ausrichtung der Pigmente erfolgt demzufolge unmittelbar nach beziehungsweise mit der Farbspaltung und ändert sich danach in so geringem Umfang, dass dies in dem Prüfstand aus den Kameradaten nicht sichtbar wird.

Da bisher keine Geräte zur Inline-Prozesskontrolle für gedruckte Interferenzeffektfarben existieren und die Qualitätsbewertung des Color-Shift in der Praxis rein visuell erfolgt, wurde in demselben Prüfstand untersucht, ob sich ein kamerabasiertes Druckinspektionssystem dafür eignet. Dazu wurde die von *Hupp* patentierte Helligkeitsdifferenz  $L_H$  aus den Kameradaten berechnet, die sich linear zur gedruckten Schichtdicke ändert. Als Referenz wurde für alle Proben der  $L_H$ -Wert aus Messungen mit einem Mehrwinkelspektrofotometer bestimmt und bei vielen Proben die gedruckte Schichtdicke konfokalmikroskopisch gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass sich ein in der Druckbranche übliches Druckinspektionssystem generell zur Messung des  $L_H$ -Wertes auch für Interferenzeffektpigmente der 2. Generation eignet. Eine lineare Korrelation zu den gemessenen Schichtdicken konnte jedoch nicht bestätigt werden.



---

Zur messtechnischen Erfassung der Homogenität gedruckter Schichten ist nicht nur in Bezug auf Interferenzeffektfarben die Entwicklung einer geeigneten Methode wünschenswert. Ob sich die von einem Scanner aufgezeichneten Daten dazu eignen, gilt es zu untersuchen. Da ständig neue Effektpigmente mit neuartigen optischen Effekten auf dem Markt erscheinen, sollte zudem die gewählte Methode zur Bestimmung des Color-Shifts aus nur zwei unterschiedlichen Messgeometrien beobachtet und gegebenenfalls angepasst werden.

Um die Aussagen aus den in Kapitel 5 gewonnenen Ergebnissen weiter zu untermauern, sind weitere Versuche notwendig, die sich auf eine Variation der genannten Haupteinflussparameter beschränken sollten. Dies könnte durch einen statistischen Versuchsplan umgesetzt werden, der die Möglichkeit zur Untersuchung von Wechselwirkungen und quadratischen Effekten beinhaltet. Weiterhin wären basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen Feldversuche auf anderen Druckmaschinen zur Verifizierung wünschenswert. Damit könnte sowohl eine Übertragbarkeit der Ergebnisse als auch eine Dauerstabilität des Druckprozesses überprüft werden. Da der Einfluss unterschiedlicher Rasterwalzen und Druckformtypen nicht untersucht wurde, können bisher im Zusammenhang mit Interferenzeffektfarben keine Aussagen auf deren Auswirkungen auf das Druckergebnis getroffen werden. Um Folien als Bedruckstoffe auch bei höheren Geschwindigkeiten in weitere Druckversuche integrieren zu können, wird eine längere Trocknungsstrecke benötigt, um ein Verblocken zu verhindern.

Um die Eignung eines kamerabasierten Druckinspektionssystem zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben nachweisen zu können, sind weitere Versuche notwendig. Dafür wird sowohl eine konstante Beleuchtung über die Druckbreite als auch eine kalibrierbare Kamera empfohlen was zu geringeren Messabweichungen führen wird. Schichtdickenmessungen sind bei Druckproben generell nicht einfach umzusetzen. Es ist zu überprüfen, ob sich nicht weitere Größen für eine Prozesskontrolle eignen.

## **7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

---

# Literaturverzeichnis

- [1] G. Pfaff. *Spezielle Effektpigmente*. Vincentz, Hannover, 2007.
- [2] H. Hupp und E. Dörsam. *Verfahren zur messtechnischen Erfassung von einer auf einen Bedruckstoff aufgetragenen Farbschicht*. DE102007061899B4. Patent, April 2011.
- [3] W. Walenski. *Druckveredelung: Wissen kompakt*. Online, Dezember 2011. <<http://www.gutenbergblog.de/produktionstechnik/druckveredelung-wissen-kompakt-2853.html>> [Zugriff am 19.12.2011]
- [4] A. Goldschmidt und H. J. Streitberger. *BASF-Handbuch Lackiertechnik*. Vincentz, Hannover, 2002.
- [5] K. P. Nicolay. Verpackung ist Werbung pur. *Druckmarkt -Das Managementmagazin für Publishing & Print*, 45:S. 20–22, Dezember 2006.
- [6] F. R. Esch. *Impulse im Regal - Die Bedeutung der Verpackungsgestaltung für die Kaufentscheidung am POS*. Justus-Liebig-Universität Gießen - Institut für Marken- und Kommunikationsforschung und STI Group. Online, November 2006. <[http://www.sti-group.com/media/de/download/Ergebnisse\\_Packaging-Studie.pdf](http://www.sti-group.com/media/de/download/Ergebnisse_Packaging-Studie.pdf)> [Zugriff am 11.2006]
- [7] H. G. Böcher. *Prägefoliendruck. Verfahren, Technik und Gestaltung*. Verpackung und Technik. Hütthig, Heidelberg, 2005.
- [8] F. Morlok und T. Beckmann. *EXTRA: Enzyklopädie der experimentellen Druckveredelung*. Birkhäuser, Basel, 2009.
- [9] C. D. Thomas. Veredelten Verpackungen gehört die Zukunft. *Der Druckspiegel*, 08-09/2011:S. 28f, 08-09 2011.
- [10] *Druck-Wachstum erst 2012*. bvdm. Online, Juli 2011. <<http://druck-medien.net/aktuell/newsdetail/article/15677-bvdm-druck-wachstum-erst-2012/12/dienstleister-1/>> [Zugriff am 07.2011]

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [11] K. H. Meyer. *Technik des Flexodrucks*. Rek & Thomas, St. Gallen, 2006.
- [12] *Prozessstandard Offsetdruck*. ISO 12647-2, internationaler Standard, Bundesverband Druck und Medien e.V., 2007.
- [13] *Graphic technology - Process control for the production of half-tone colour separations, proofs and production prints -Part 6: Flexographic printing*. ISO 12647-6, internationaler Standard, 2006.
- [14] Printing Standard Network. *Optimisation of Printing Processes - ISO 12647*. Online, April 2011.  
<[http://www.pso-insider.de/fileadmin/user\\_upload/news\\_PDF/Best\\_Practice\\_ISO\\_12647\\_pages.pdf](http://www.pso-insider.de/fileadmin/user_upload/news_PDF/Best_Practice_ISO_12647_pages.pdf)> [Zugriff am 04.2011]
- [15] H. Hupp. *Qualitäts- und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben erster Generation*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008.  
<<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1016/>>
- [16] H. D. Koswig. *Flüssige Kristalle : Eine Einführung in ihre Anwendung*. Dt. Verl. der Wiss., Berlin, 1990.
- [17] W. R. Cramer. Ohne Glimmer, aber mit Glitzer. *Farbe & Lack*, 109. Jahrgang:132 – 136, 04/2003.
- [18] M. Kieser. *Formulations*. EP0634459. Patent, April 2001.
- [19] G. Pfaff und P. Reynders. Angle-dependent optical effects deriving from submicron structures of films and pigments. *Chemical Reviews*, 99(7):1963–1981, 1999.
- [20] F. J. Maile, G. Pfaff und P. Reynders. Effect pigments - past, present and future. *Progress in Organic Coatings*, 54(3):150–163, 2005.
- [21] R. S. Berns, F. W. Billmeyer und M. Saltzman. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. Wiley, New York, 2000.
- [22] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2 Elektronische Ressource. Elektrizität und Optik*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [23] M. Knoth. *Zur Realstruktur von Perlglanzpigmenten*. Berichte aus der Materialwissenschaft. Shaker, Aachen, 2006.
- [24] BYK-Gardner GmbH. *BYK-Gardner Katalog 2010-2011 - Qualitätskontrolle für Lacke und Kunststoffe*, August 2007.
- [25] Merck. *Colorstream T10-02 Arctic Fire - Sicherheitsdatenblatt*, 2007.

- [26] Merck. *Colorstream T10-02 Arctic Fire - Spezifikation*, 2011.
- [27] Merck. *Iriodin 7215 Ultra Rot - Spezifikation*, 2011.
- [28] Merck. *Miraval 5321 Scenic Copper - Spezifikation*, 2010.
- [29] Merck. *Iriodin 211 Rutil Feinrot - Spezifikation*, 2010.
- [30] BASF. *Effect Pigments - Firemist Blue 9G630L - Technical Data Sheet*, 2009.
- [31] M. Haas, E. Dörsam, E. Kurmakaev, T. Euler, M. Schmitt-Lewen, J. Sonnenschein und I. Fergen. Impacts on the Impression of Printed Effect Pigments. In *Advances in printing and media technology, Vol. XXXVIII : Proceedings of the 38th International Research Conference of IARIGAI, Budapest, Hungary, September 2010, 11 - 14*, Vol. 38. iarigai, 2011.
- [32] T. I. Trofimova. *Physik*. Vieweg u.a., Braunschweig u.a., 1997.
- [33] R. Maisch und M. Weigand. *Perlglanzpigmente. Physikalische Grundlagen, Eigenschaften, Anwendungen*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1991.
- [34] W. Bäumer. Perlglanz und Perlglanzpigmente Teil 1. *Farbe & Lack*, S. 530 – 536, 06/1973.
- [35] P. Wißling und U. Zorll. *Metalleffekt-Pigmente. Grundlagen und Anwendungen*. Vincentz, Hannover, 2005.
- [36] E. Dörsam. *Praktische Farbmessung*, Vorlesung, SS 2010. Technische Universität Darmstadt.
- [37] B. Grande. *Skript Offsetdruckfarben*. Online, 2004.  
<<http://www.offset-druck-farben.de/download/skfarben.pdf>> [Zugriff am 20.11.2011]
- [38] K. Pawlowski. *Untersuchungen zur Bestimmung der Farbdichte druckfrischer Offsetfarben druch ein Druckinspektionssystem*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2010.  
<<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2761/>>
- [39] R. Maaß. *PrintPerfection*. Online.  
<<http://www.printperfection.de/veredelung/iriodinlackierung>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [40] *STI Group*. Online. <<http://www.sti-group.com/de/de/showroom/showroom.html>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [41] STI Group. *EFTA und FTA Award für «prickelnde» Regalverpackung*. Online.  
<<http://mediaforum.ch/packs/index.html?selweek=15&selyear=2008#000606>> [Zugriff am 31.01.2012]

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [42] A. Gröppel-Klein und P. Weinberg. *Konsumentenverhaltensforschung im 21. Jahrhundert*. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2008.
- [43] Merck. *glanz-effekte.de*. Online. <<http://www.glanz-effekte.de/>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [44] Merck. *Effect Pigments - Colorcard Screen Printing*, 2007.
- [45] Deutsches Institut Druck. *Be EFFECTive: Musterbuch für Druckveredelung im Siebdruck; Sample book of serigraphic print finishing effects*. Print & Media Forum AG, Wiesbaden, 2004.
- [46] Merck. *Effect Pigments - Colorcard Offset Printing*, 2007.
- [47] Merck. *Effect Pigments - Colorcard Gravure Printing*, 2007.
- [48] Merck. *Effect Pigments - Colorcard Offset Coating*, 2007.
- [49] Merck. *Effect Pigments - Colorcard Flexo Printing*, 2007.
- [50] S. Hafner. *Drucktechnik - Hochdruck, Tiefdruck und Siebdruck*, Vorlesung, SS 2011. Hochschule Darmstadt.
- [51] A. Theopold und E. Dörsam. Characterization of flexographic printing plates with regard to the field of printed electronics. In *Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) 2011*, S. 330–334, 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/51934/>>
- [52] H. Kipphan. *Handbuch der Printmedien : Technologien und Produktionsverfahren; mit 85 Tabellen*. Springer, Berlin, 2000.
- [53] E. Dörsam. *Printing Technology for Electronics*, Vorlesung, SS 2011. Universität Heidelberg.
- [54] *Rund um die Rasterwalze*. Zecher GmbH. Online, Januar 2012. <[http://www.zecher.com/uploads/media/AniloxBasics\\_DEU.pdf](http://www.zecher.com/uploads/media/AniloxBasics_DEU.pdf)> [Zugriff am 07.01.2012]
- [55] N. Bornemann, H. M. Sauer und E. Dörsam. Thin Film Behaviour after Ink Transfer in Printing Process. In *Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) 2010*, 2010. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42724/>>
- [56] J. Neumann. *Methode zur Volumenstrommessung und zur Viskositätskontrolle von Beschichtungsfluiden der grafischen Industrie*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Göttingen, 2009. <<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2385/>>
- [57] F. Bernhard. *Stoffe der Printmedientechnik-Farbe*, Vorlesung, WS 2007/08. Technische Universität Chemnitz.

- [58] S. Hafner und Print Media Academy Heidelberger Druckmaschinen AG. *Drucktechnik - Offsetdrucktechnik Inline-Lackieren und Trocknen*, Vorlesung, SS 2011. Hochschule Darmstadt.
- [59] Verein Deutscher Druckingenieure. Seminarreihe Inline-Farbmessung. *Der Druckspiegel*, 08-09/2011:36–37, 08-09 2011.
- [60] Verein Deutscher Druckingenieure. Seminarreihe Inline-Farbmessung. *Der Druckspiegel*, 11/2011:56, November 2011.
- [61] Heidelberger Druckmaschinen AG. *Fachwissen Farbe & Qualität*, September 2008.
- [62] DIN 5033 bis DIN 55929, deutscher Standard, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2000.
- [63] L. Gall. *Remission oder Reflexion?* Online.  
<<http://www.farbmetrik-gall.de/farbmetrik/remorref.html>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [64] *Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik - Farbdichtemessungen an Drucken- Teil 2: Anforderungen an die Messanordnung von Farbdichtemessgeräten und ihre Prüfung*. DIN 16536-2, deutscher Standard, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1995.
- [65] A. Williams. Interinstrumentelle Übereinstimmungen bei Farb- und Dichtemessungen. Technischer Bericht, IFRA, Februar 2007.
- [66] E. Dörsam. *Farwiedergabe in den Medien*, Vorlesung, WS 2010/11. Technische Universität Darmstadt.
- [67] H. G. Völz. *Industrielle Farbprüfung. Grundlagen und Methoden*. VCH, Weinheim u.a., 2001.
- [68] K. Schläpfer, Editor. *UGRA Mitteilungen*, Vol. 1/78. Redaktion UGRA-Mitteilungen, Juni 1978.
- [69] Wetterwart-Lacke. *Kundeninformation - Glanzgrade - DIN / Euronorm / ISO*. Online.  
<[http://www.wetterwart.com/files/Glanzgradermittlung\\_nach\\_DIN.pdf](http://www.wetterwart.com/files/Glanzgradermittlung_nach_DIN.pdf)> [Zugriff am 31.01.2012]
- [70] *Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen*. DIN 67530, deutscher Standard, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Januar 1982.
- [71] *Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik - Bestimmung der visuellen Glanzzahl von Drucken*. DIN16537, deutscher Standard, DIN Deutsches Institut Für Normung e.V., 1998.
- [72] Professoren und Mitarbeiter des Fachbereich Medien. *Mess- und Prüfmöglichkeiten - Mit Strategie prüfen - Informationen über die am Fachbereich Medien möglichen Verfahren zur Material- und Produktprüfung*. Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH). Online, Mai 2008.

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- <[http://www.fbm.htwk-leipzig.de/fileadmin/fbmedien/unsort\\_download/HTWK-Mess\\_und\\_Pruef\\_Bildsch.pdf](http://www.fbm.htwk-leipzig.de/fileadmin/fbmedien/unsort_download/HTWK-Mess_und_Pruef_Bildsch.pdf)> [Zugriff am 05.2008]
- [73] *Jahresbericht 2005 Normenausschuss Druck- und Reproduktionstechnik (NDR)*. deutscher Standard, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2005.
- [74] W. R. Cramer und P. W. Gabel. Measuring Special Effects. *Paint & Coatings Industry*, S. 36–43, 9/2001.
- [75] K. Kehren, Ph. Urban, E. Dörsam, A. Höpe und D. R. Wyble. Performance of multi-angle spectrophotometers. In *Midterm Meeting of the International Colour Association (AIC)*, S. 473–476, Juni 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/50891/>>
- [76] K. Kehren, Ph. Urban und E. Dörsam. Bidirectional Reflectance and Texture Database of Printed Special Effect Colors. In *19th Color and Imaging Conference*, S. 316–321, November 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/55079/>>
- [77] H. Hupp. *Qualitäts- und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben erster Generation*, Juni 2008. - Seminarvortrag, Verein Deutscher Druckingenieure.
- [78] Laser 2000 GmbH. *ADM-Vates - Farb- und Glanzmessgerät*. Online. <<http://www.laser2000.de/index.php?id=373947>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [79] X-rite. *Online Glanzmessung*. Online, 06 2005. <[http://www.industrie.de/industrie/live/index2.php?menu=1&submenu=3&object\\_id=30443408](http://www.industrie.de/industrie/live/index2.php?menu=1&submenu=3&object_id=30443408)> [Zugriff am 06.2005]
- [80] Erichsen GmbH & Co. KG. *On-Line-Glanzmessstechnik mit System*. Online. <<http://www.erichsen.de/oberflaechenpruefung/glanz/glossmaster-online-507-60b0>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [81] Sensor Instruments GmbH. *Farb-Glanzsensoren Datenblatt SI-COLO-GD-40*. Online. <[http://www.pro-4-pro.com/media/product\\_data/4965dfa50deb3/download.pdf](http://www.pro-4-pro.com/media/product_data/4965dfa50deb3/download.pdf)> [Zugriff am 31.01.2012]
- [82] K. H. Meyer. *Technik des Flexodrucks*. Coating-Fachbücher. Coating, St. Gallen, 1999.
- [83] Merck. *Effektpigmente für die Druckindustrie - vom Design zum Druck*, 2007.
- [84] S. Bühne, A. Woocker und A. Linzmaier. Orientierung von Effektpigmenten. *Farbe & Lack*, 114. Jahrgang:34–39, 11/2008.



- [85] J. S. Preston, L. F. Gate, J. C. Husband, A. Legrix, M. Jones und D. J. Parsons. Ink Gloss Development Mechanisms After Printing Part 1 - The Influence Of Ink Film Thickness. *TAGA JOURNAL*, 1:144–156, 2005.
- [86] J. S. Preston, D. J. Parsons, J. C. Husband und C. Nutbeem. Ink Gloss Development Mechanisms After Printing Part 2 - The Influence Of Substrate. *Advanced Coating Fundamentals Symposium Proceedings*, (1), Mai 2003.
- [87] H. Hupp und E. Dörsam. Measuring printed special-effect colours - First Experiences with the MultiFX10 spectrophotometer. In *Proceedings of the 34th International Research Conference of IARIGAI*, 2007.
- [88] H. M. Sauer, N. Bornemann und E. Dörsam. Viscous fingering in functional flexo printing: an inevitable bug? In *Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) 2011*, S. 309–312, 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/52108/>>
- [89] N. Bornemann. Dewetting of printed ultra-thin layers of small-molecule semiconductors. In *Symposium Funktionalisierung und Prozessierung dünner Schichten (Evonik Industries)*, Mai 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/50349/>>
- [90] N. Bornemann, H. M. Sauer und E. Dörsam. Gravure Printed Ultrathin Layers of Small-Molecule Semiconductors on Glass. *Journal of Imaging Science and Technology*, 55(4), Juli 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/52290/>>
- [91] R. Thieme. *Untersuchung der Farbübertragung im Offsetdruck mit Haschurrasterwalzen*. Doktorandenkolloquium, Bodenrod, März 2012.
- [92] S. Griesheimer. *Experimentelle Untersuchung zur Farbspaltung und Farbübertragung im Flexodruck*. Doktorandenkolloquium, Bodenrod, März 2012.
- [93] C. Ranfeld, H. M. Sauer und E. Dörsam. Using the Halo Effect in Flexographic Printing for the Manufacturing of Source-Drain-Structures for Thin Film Transistors. In *Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) 2011*, 2011. <<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/52027/>>
- [94] K. Happel. *LED-Based Light Scattering Measurements of Papers for Printing Applications*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2011. <<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2850/>>
- [95] W. R. Cramer. Der richtige Blickwinkel. *Farbe & Lack*, 112. Jahrgang, 09/2006.

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [96] *Standard Practice for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments. Revision 16.0.* ASTM WK 1164, amerikanischer Standard, American Society for Testing and Materials, 2006.
- [97] *Standard Practice for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments.* ASTM E2539-08, amerikanischer Standard, American Society for Testing and Materials, 2008.
- [98] Datacolor. *Datacolor FX10.* Manual.
- [99] X-rite. *X-rite MA98.* Manual.
- [100] K. Siebertz, D. van Bebbber und T. Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE).* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [101] Merck. *Iriodin 211 Rutil Feinrot - Sicherheitsdatenblatt,* 2007.
- [102] Merck. *Iriodin 7215 Ultra Rot - Sicherheitsdatenblatt,* 2007.
- [103] *Standard Guide for Designing and Conducting Visual Experiments.* ASTM E1808 - 96(2009), amerikanischer Standard, American Society for Testing and Materials, 2003.
- [104] Carsten Bettner. *Aufbau eines Prüfstandes zur visuellen Abmusterung von Interferenzeffektfarben.* Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt - IDD, 2008.
- [105] Theo Wember. *Technische Statistik und statistische Versuchsplanung.* Version 8.5.
- [106] Pertuz. *Focus Measure.* The Math Works, Inc. Online. Online, Januar 2012.  
<<http://www.mathworks.de/matlabcentral/fileexchange/27314-focus-measure>> [Zugriff am 11.01.2012]
- [107] S. Stahl. *Experimentelle Untersuchungen zur Schichtbildung von funktionalen Materialien im Tiefdruck.* Doktorandenkolloquium, Bodenrod, März 2012.
- [108] J. Fetter. *Verfahren zur Messung von Farbschichtdicken in Druckwerken mittels ferromagnetischer Resonanz.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [109] Sensofar. *PLu neox - 3D Optical Profiler,* 2009.
- [110] M. Schmitt-Lewen, J. Sonnenschein, E. Dörsam, T. Euler, M. Haas und E. Kurmakaev. *Verfahren zum drucktechnischen Erzeugen einer strukturierten Fläche.* DE102011012274 A1. Patent, September 2011.
- [111] M. Mahner. *Statistische Versuchsplanung am Beispiel der Untersuchung von Ölemissionen eines Ottomotors.* Master Thesis, Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim, 2011.

- [112] W. Kleppmann. *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. Carl Hanser Verlag, München, 2008.
- [113] J. Antony. *Design of experiments for engineers and scientists*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam u.a., 2010.
- [114] R. A. Fisher. *The Design of experiments*. Oliver & Boyd, Edinburgh, 1935.
- [115] D. Haase. *Ein neues Verfahren zur modellbasierten Prozessoptimierung auf der Grundlage der statistischen Versuchsplanung am Beispiel eines Ottomotors mit elektromagnetischer Ventilsteuerung (EMVS)*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2004.
- [116] W. Engeln. *Methoden der Produktentwicklung*. Oldenbourg-Industrieverlag, München, 2011.
- [117] M. Mahner. Qualifizierung und Optimierung einer Farbauftragseinrichtung zur Durchführung von Machbarkeitsuntersuchungen zum Mikroprägen. Bachelorthesis, Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim, 2011.
- [118] S. E. Orchard. On surface levelling in viscous liquids and gels. *Applied Scientific Research*, 11:451–464, 1963.
- [119] camLine. *Cornerstone Regression User's Guide, Revision 5.1*. Manual, Juli 2011.
- [120] K. L. Majumder und G. P. Bhattacharjee. Algorithm AS 63: The Incomplete Beta Integral. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 22(3):409–411, 1973.
- [121] L. Rade und B. Westergren. *Springers mathematische Formeln - Taschenbuch für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Wirtschaftswissenschaftler*. Springer, Berlin u.a., 1996.
- [122] L. Fahrmeir. *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Statistik und ihre Anwendungen. Springer, Berlin, 2009.
- [123] Osram GmbH. *Licht kann weiß, weiß, weiß oder weiß sein.*, 2011.  
<<http://www.wes4you.de/download/lichtfarben.pdf>> [Zugriff am 31.01.2012]
- [124] Siegwerk. *UV Flexfarben SICURA FLEX 39-6*, November 2007.
- [125] *Colorspace Transformations*. The MathWorks, Inc. Online, September 2010.  
<<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28790-colorspace-transformations>>  
[Zugriff am 17.01.2012]

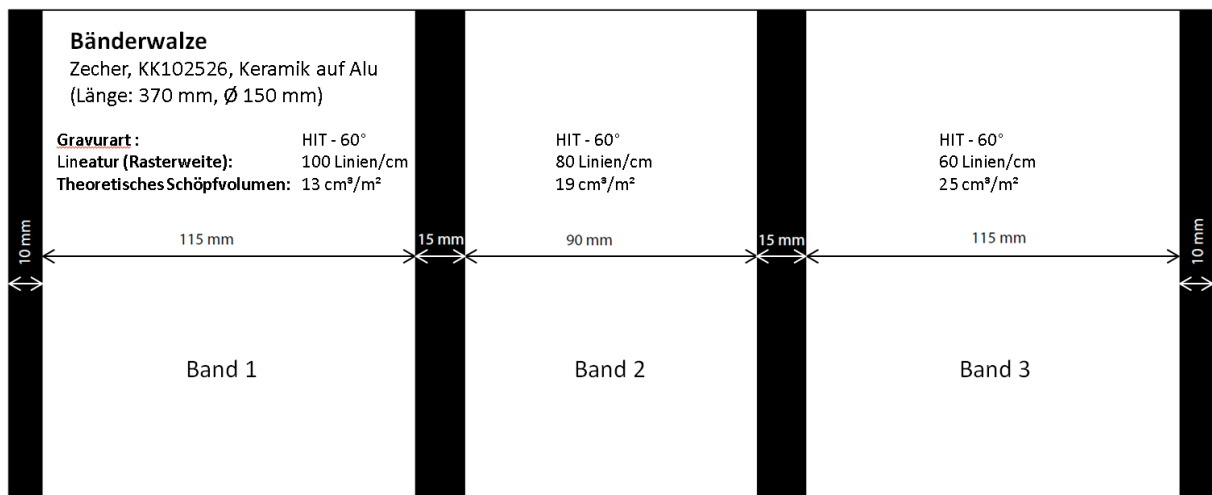
## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [126] TVI-Vision. XIIMUS - When you need a fast colour camera with wide dynamic range, 2007.  
<[http://www.ads-img.co.jp/products/tvi-vision/pdf/XIIMUS\\_512\\_1K\\_2K\\_HighSpeed.pdf](http://www.ads-img.co.jp/products/tvi-vision/pdf/XIIMUS_512_1K_2K_HighSpeed.pdf)>  
[Zugriff am 31.01.2012]
- [127] Heraeus. *Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse*. Heraeus Holding GmbH. Online, Januar 2012. <[http://www.heraeus-noblelight.com/media/webmedia\\_local/media/pdf/ip/products\\_6/irfrindustrie/irstrahlerfrdieindustrie.pdf](http://www.heraeus-noblelight.com/media/webmedia_local/media/pdf/ip/products_6/irfrindustrie/irstrahlerfrdieindustrie.pdf)> [Zugriff am 30.01.2012]

## Anhang A

# Technische Daten und zusätzliche Informationen



**Abbildung A.1:** Technische Daten der Bänderwalze, die für das Verdrucken von Effektpigmentfarben in Kapitel 5 verwendet wurde.

# Gallus RCS 330-HD

## Modulare Rollendruckmaschine

---

Produktionsnahe Versuchsplattform für „gedruckte Funktionalität“  
Spezielle Konfiguration der Gallus RCS 330

---

### Anwendungsbereich

In der industriellen Produktion wird die Gallus RCS 330 hauptsächlich im Etikettendruck eingesetzt.

Die speziell für das Drucken funktionaler Schichten konfigurierte Gallus RCS 330-HD ist in ihrer Form aufgrund folgender Besonderheiten weltweit einmalig:

- Alle vorhandenen Druckverfahren (Flexo-, Tief-, Sieb-, Offset- und Inkjet-Druck) sind gleichzeitig einsetzbar und in ihrer Reihenfolge leicht modular vertauschbar. Dadurch ergeben sich - ohne den Einsatz von wasserlosen und konventionellen Offsetdruck zu unterscheiden - 325 verschiedene Maschinenkonfigurationen.
- Einen weiteren Freiheitsgrad stellt der mögliche Einsatz verschiedenster Druckfarben bzw. Materialien dar. Eine „Leereinheit“ nach allen Druckwerken bietet zusätzlich zur serienmäßigen UV-Härtung die Möglichkeit einer vorherigen Heißluft/IR-Trocknung ohne Bahnlaufänderung.



### Technische Daten

Gesamtlänge.....	15 m
Gesamtmasse.....	26,6 t
Wirkleistung.....	50 kW
Format der Druckverfahren.....	18 Zoll (möglich 12 - 24 Zoll)
Bahnbreite.....	160 - 330 mm
Bedruckstoffdicke.....	10 - 400 µm
maximale Bahngeschwindigkeit.....	160 m/min
Antriebstechnik.....	Servo Direktantrieb aller Druckzylinder
Leistung UV-Trocknungssystem.....	200 W/cm
Leistung des Heißluft/IR-Trocknermoduls.....	24 kW

### Druckverfahren

Flexodruckwerk.....	Einsatz flacher Klischees und Sleeve-Technik
Offsetdruckwerk.....	konventioneller und wasserloser Offsetdruck
Siebdruck.....	rotativer Siebdruck
Tiefdruck.....	Rakeltiefdruck
Inkjet.....	zusätzlich installiertes Gerät

---

Abbildung A.2: Informationen zur *Gallus RCS330-HD*

Versuchsprotokoll	
<b>Versuchsnummer:</b>	091116_TUD_DoE
<b>Druckmaschine:</b>	Gallus RCS 330-HD
<b>Abdruckzeitraum (von/bis):</b>	Offset: 02.06.2009 - 03.06.2009, Flexo: 17.11.2009 - 23.11.2009
<b>Bedruckstoff 1:</b>	Maxi Satin, Hersteller: IGEPA-Group, matt gestrichenes Bilderdruckpapier, Grammatur: 90 g/m <sup>2</sup> , Produktblatt: <a href="http://www.stiassny.at/pa_ma_maxi_satin.html">http://www.stiassny.at/pa_ma_maxi_satin.html</a>
<b>Bedruckstoff 2:</b>	OPP-Folie, Hersteller: Treofan-Gruppe, Treofan TNT 40 weiß, Dicke: 40 µm
<b>Offsetdruckwerk</b>	
<b>Gummituch:</b>	Hersteller: Phoenix Xtra Blankets, Typ: Ruby CARAT, 1,70 mm + 0,3 mm Klebeschicht Datenblatt: <a href="http://www.pxp-online.com/pages/produkte/ruby/download/ruby_de.pdf">http://www.pxp-online.com/pages/produkte/ruby/download/ruby_de.pdf</a>
<b>Druckformen:</b>	Hersteller: Kodak, Typ: Sword Ultra, Dicke: 0,28 - 0,3 mm, Produktinformation: <a href="http://www.wagasil.de/files/kodakswordultra.pdf">http://www.wagasil.de/files/kodakswordultra.pdf</a>
<b>Farbe 1:</b>	Hersteller: Epple, 60 - 4508, endlos schwarz Offset UV
<b>Farbe 2:</b>	Hersteller: Epple, HKS 13, gemischt aus 44216 Euro-Rot Offset UV und 44215 Euro-Gelb Offset UV
<b>Flexodruckwerk</b>	
<b>Rasterwalze:</b>	Hersteller: Zecher, KK102526, Keramik auf Alu, HIT-60°-Gravur, siehe Abbildung Bänderwalze: 60 L/cm, 25 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> , 80 L/cm, 19 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> , 100 L/cm, 13 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Rakel:</b>	Hersteller: Daetwyler, Typ: duralife, Breite: 20 mm, Produktinformation: <a href="http://www.daetwyler.co.uk/images/DURALIFE_e_Ansicht.pdf">http://www.daetwyler.co.uk/images/DURALIFE_e_Ansicht.pdf</a>
<b>Flexodruckform:</b>	Hersteller: Flint, Typ: Nyloflex FAH Digital, Dicke: 1,14 mm, Lineatur: 48 Linien/cm, Shore-Härte: 60°ShA, siehe Abbildung, Technisches Datenblatt: <a href="http://www.flintgrp.com/en/documents/Printing-Plates/nyloflex/nyloflex_techn_data_DE.pdf">http://www.flintgrp.com/en/documents/Printing-Plates/nyloflex/nyloflex_techn_data_DE.pdf</a>
<b>Unterbau:</b>	Hersteller: tesa, Typ: softprint 52015, Dicke: 0,38 mm, Produktinformation: <a href="http://www.tesa.de/industry/products/tesa_softprint_52015_steel_master.html">http://www.tesa.de/industry/products/tesa_softprint_52015_steel_master.html</a>
<b>Lack:</b>	Hersteller: Sun Chemical, Solarauqua FLHF 00001
<b>Pigment 1:</b>	Hersteller: Merck, Iridin 7215 Ultrarot, Pigmentgröße: 10 - 60 µm
<b>Pigment 2:</b>	Hersteller: Merck, Colorstream T10-02 Arctic Fire, Pigmentgröße: 5 - 50µm
<b>Pigment 3:</b>	Hersteller: Merck, Miraval 5321 Scenic Copper, Pigmentgröße: 10 - 100 µm
<b>Pigment 4:</b>	Hersteller: Merck, Iridin 211 Rutil Feinrot, Pigmentgröße: 5 - 25 µm

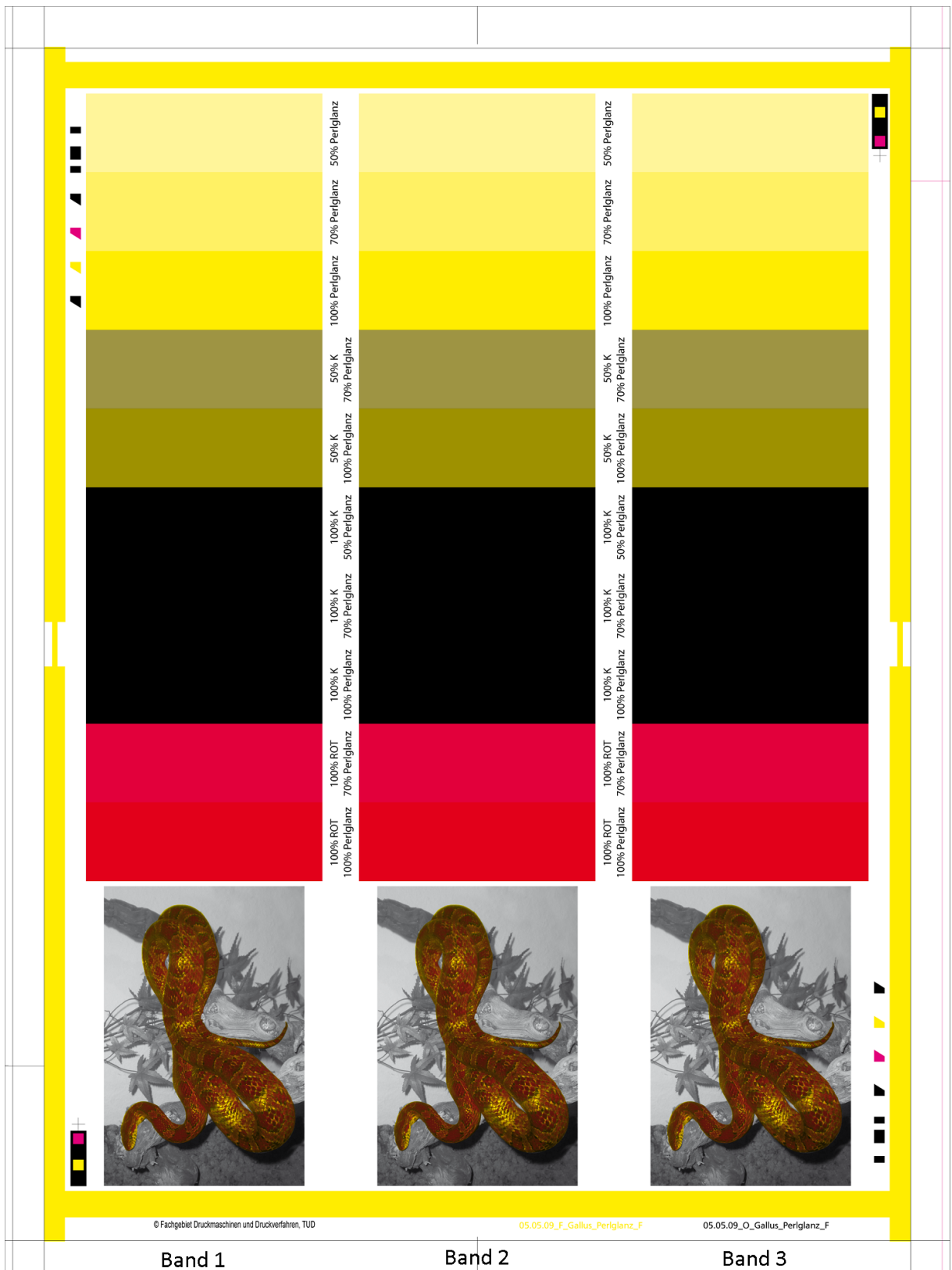
**Abbildung A.3:** Versuchsprotokoll zur Versuchsreihe nach statistischer Versuchsplanung (siehe Kapitel 5 und Abbildung A.4)

## A. TECHNISCHE DATEN UND ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN

Druck- versuch	Substrat	Pigmentart	Pigment- konz. [%]	Trockner 1 Heißluft	Trockner 2 Heißluft	Trockner 1 IR-Strahler	Trockner 2 IR-Strahler	Trockner- position	Druckgeschw. [m/min]
1	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	20	ein	aus	0	0	LE3	20
2	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	20	ein	aus	0	0	LE3	30
3	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	20	ein	aus	0	0	LE3	50
4	OPP	Miraval 5321 Scenic Copper	30	ein	ein	0	0	LE3	20
5	OPP	Miraval 5321 Scenic Copper	30	ein	ein	0	0	LE3	30
6	OPP	Miraval 5321 Scenic Copper	30	ein	ein	0	0	LE3	50
7	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	10	ein	aus	2	0	LE3	20
8	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	10	ein	aus	2	0	LE3	30
9	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	10	ein	aus	2	0	LE3	50
10	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	20	ein	ein	1	2	LE3	20
11	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	20	ein	ein	1	2	LE3	30
12	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	20	ein	ein	1	2	LE3	50
13	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	20	ein	ein	2	1	LE3	20
14	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	20	ein	ein	2	1	LE3	30
15	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	20	ein	ein	2	1	LE3	50
16	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	30	aus	ein	0	1	LE3	20
17	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	30	aus	ein	0	1	LE3	30
18	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	30	aus	ein	0	1	LE3	50
19	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	30	ein	ein	2	2	LE4	20
20	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	30	ein	ein	2	2	LE4	30
21	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	30	ein	ein	2	2	LE4	50
22	OPP	Iriodin 7215 Ultrarot	30	ein	ein	0	0	LE4	20
23	OPP	Iriodin 7215 Ultrarot	30	ein	ein	0	0	LE4	30
24	OPP	Iriodin 7215 Ultrarot	30	ein	ein	0	0	LE4	50
25	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	10	aus	ein	0	0	LE4	20
26	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	10	aus	ein	0	0	LE4	30
27	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	10	aus	ein	0	0	LE4	50
28	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	20	ein	ein	1	1	LE4	20
29	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	20	ein	ein	1	1	LE4	30
30	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	20	ein	ein	1	1	LE4	50
31	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	10	ein	ein	0	0	LE4	20
32	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	10	ein	ein	0	0	LE4	30
33	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	10	ein	ein	0	0	LE4	50
34	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	10	ein	ein	2	1	LE2	20
35	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	10	ein	ein	2	1	LE2	30
36	Maxi Satin	Iriodin 7215 Ultrarot	10	ein	ein	2	1	LE2	50
37	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	20	aus	ein	0	2	LE2	20
38	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	20	aus	ein	0	2	LE2	30
39	Maxi Satin	Miraval 5321 Scenic Copper	20	aus	ein	0	2	LE2	50
40	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	30	ein	aus	1	0	LE2	20
41	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	30	ein	aus	1	0	LE2	30
42	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	30	ein	aus	1	0	LE2	50
43	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	30	ein	ein	0	2	LE2	20
44	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	30	ein	ein	0	2	LE2	30
45	Maxi Satin	Iriodin 211 Rutil Feinrot	30	ein	ein	0	2	LE2	50
46	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	20	ein	ein	2	0	LE2	20
47	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	20	ein	ein	2	0	LE2	30
48	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	20	ein	ein	2	0	LE2	50
49	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	10	ein	ein	1	2	LE2	20
50	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	10	ein	ein	1	2	LE2	30
51	Maxi Satin	Color-Stream T10-02 Arctic Fire	10	ein	ein	1	2	LE2	50

Abbildung A.4: Versuchsplan nach statistischer Versuchsplanung (siehe Kapitel 5)





**Abbildung A.5:** Layout aller Druckformen (2 Offset: rot und schwarz, 1 Flexo: Effektpigmentfarbe), die in Kapitel 5 eingesetzt wurden. Druckrichtung von oben nach unten. Es sind die Bänder der Bänderwalze eingezeichnet (siehe Abbildung A.1).

## A. TECHNISCHE DATEN UND ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN

---



### TECHNISCHE DATEN

---

**Ihre Bestellnummer:** 4503617505 vom 29.11.07.  
**Kennwort:** Isabella Holzwarth  
**Auftragsnummer:** HD / TU Darmstadt  
**Anlagentyp:** 0.70381  
**Übersichtzeichnung:** HID-2x2-GA-RCS 330  
97648

#### Elektrik:

Betriebsspannung: 400 V  
Frequenz: 50 Hz  
Steuerspannung: 230 V  
Gesamtstromaufnahme: 155 A  
Bauseitige Zuleitung: Nach örtlicher Vorschrift  
Bauseitige Absicherung: 200 Agl (träge) für 4 HD Trockner  
Lampentyp: IRK, 2,5 kW

#### Lakierung:

Farbton: RAL 7035, lichtgrau

#### Zuluft (pro HID Trockner):

Zuluftmenge gesamt: 600 m<sup>3</sup>/h  
Zuluftleitung (Aggregat): 100 NW mm

FB 3201D; 5.02

#### IST METZ GmbH

Lauterstraße 14-18, D-72622 Nürtingen, Telefon +49 (0) 70 22 - 60 02-0, Fax +49 (0) 70 22 - 60 02-76  
Postfach 1409, D-72604 Nürtingen, e-mail: [info@ist-uv.com](mailto:info@ist-uv.com), <http://www.ist-uv.com>

Geschäftsführung: Dr. Armin Beying, Dirk Jagers  
Eingetragen unter HRB 220840 AG Stuttgart, USt.-Id.-Nr. DE 146262381

**Abbildung A.6:** Technische Daten der Trocknermodule (Seite 1), die für das Verdrucken von Effektpigmentfarben in Kapitel 5 verwendet wurden.

## TECHNISCHE DATEN

### Abluft (pro HID Trockner):

Abluftmenge gesamt:	740 m <sup>3</sup> /h
Abluftleitung (Aggregat):	100 NW mm
Bauseitige Abluftleitung:	180 NW (max. 10 m lang)

### Lufterhitzung (pro HID Trockner):

Heizleistung:	10 kW
---------------	-------

### Informationen aus Inbetriebnahmeprotokoll:

#### IR-Strahler:

max. Lampenstrom:	6,2 A
max. Lampenspannung:	402 V
max. Lampenleistung:	2,49 kW

#### HID Aggregat Heißluft:

max. Abluftmenge:	650 m <sup>3</sup> /h
Zuluftmenge:	ca. 622 m <sup>3</sup> /h
Luftgeschwindigkeit an den Düsen:	36-50 m/s
Lufttemperatur an den Düsen Druck an:	65-66 °C
Lufttemperatur an den Düsen Stand by:	36-38 °C
Zulufttemperatur Druck an:	77-78 °C
Zulufttemperatur Stand by:	39-43 °C

<b>Länge eines Trocknermoduls:</b>	38 cm
------------------------------------	-------

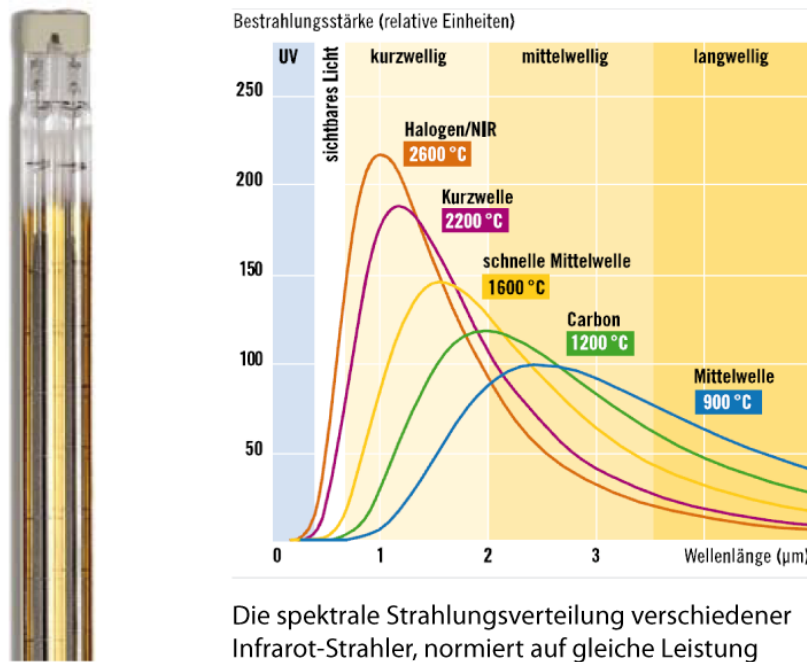
<b>Abstand zum Bedruckstoff:</b>	1 cm
----------------------------------	------

FB 3201D: 5.02

#### IST METZ GmbH

Lauterstraße 14-18, D-72622 Nürtingen, Telefon +49 (0) 70 22 - 60 02-0, Fax +49 (0) 70 22 - 60 02-76  
Postfach 1409, D-72604 Nürtingen, e-mail: [info@ist-uv.com](mailto:info@ist-uv.com), <http://www.ist-uv.com>

Geschäftsführung: Dr. Armin Beying, Dirk Jägers  
Eingetragen unter HRB 220840 AG Stuttgart, USt.-Id.-Nr. DE 146262381



### Kurzwelliger Zwillingsrohr-Infrarotstrahler

aus Quarzglas 23 x 11 mit Spezialgoldreflektor ZKB 2500/420 G

Bauform B, beide Kanäle beheizt

Spannung:	400 V
Leistung:	2500 W
Max. Leistung:	< 200 W/cm
Filament-Temperatur:	1800-2400 °C
Wellenlänge:	1.0-1.4 µm
Max. Flächenleistung:	200 kW/m <sup>2</sup>
Gesamtlänge:	480 mm
Beheizte Länge:	420 mm
Unbeheizt an der Anschlussseite:	35 mm
Unbeheizt an der Gegenseite:	25 mm
Isolierte Anschlussenden:	1000 mm
1-seitiger Anschluss	

Abbildung A.8: Technische Daten der IR-Strahler der Trocknermodule ([127] ergänzt)

**Tabelle A.1:** Materialdaten und -preise von Pigmenten, Bedruckstoffen und Lack

<b>Interferenzeffektpigment von Merck</b>	<i>Colorstream</i>	<i>Miraval</i>	<i>Iriodin</i>	<i>Iriodin</i>
	<i>Arctic Fire</i>	<i>Scenic Cooper</i>	<i>Ultra Rot</i>	<i>Rutil Feinrot</i>
Abkürzung	CS	MSC	IU	IF
Pigmentgröße [ $\mu m$ ]	10 - 50	10 - 100	10 - 60	5 - 25
mittlere Pigmentgröße [ $\mu m$ ]	16 - 23	25 - 45	18 -25	7 - 14
Kilopreis 2011 $\tilde{p}_P$ [€/kg]	323,00	137,70	52,50	46,80
mittlere Pigmentdichte $\rho_P$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,6	2,7	3,4	3,4
<b>Bedruckstoff</b>	<i>Maxi Satin</i>		OPP-Folie (Treofan, weiß)	
Abkürzung	MS		OPP	
Grammatur $g_S$ [g/m <sup>3</sup> ]	90		29,2	
Bedruckstoffpreis $\tilde{p}_S$ [€/kg]	0,88		49,3	
<b>Lack von SunChemical</b>	FLHF00001 (wasserbasiert)			
Kilopreis $\tilde{p}_L$ [€/kg]	2,6			

## A. TECHNISCHE DATEN UND ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN

---

## Anhang B

# Tabellen zur Regressionsanalyse

## B. TABELLEN ZUR REGRESSIONSANALYSE

$\Delta E^*_{ab}$ -Korr.koeff.	Const.	Bedr.: MS	Bedr.: OPP	Pigm.: CS	Pigm.: IF	Pigm.: IU	Pigm.: MSC	Pigm.konz.	HL-Tr. 1: aus	HL-Tr. 1: ein	HL-Tr. 2: aus	HL-Tr. 2: ein	IR-Tr. 1	IR-Tr. 2	Geschw.	Schöpfvol.	Halbton	t bis Tr.
Constant	1,00	-0,39	0,39	0,18	0,08	-0,06	-0,18	-0,48	0,18	-0,18	0,11	-0,11	-0,06	0,08	-0,57	-0,41	-0,38	-0,53
Bedruckstoff: MS	-0,39	1,00	-1,00	-0,29	-0,40	0,17	0,47	0,59	-0,42	0,42	-0,52	0,52	-0,35	-0,60	-0,06	0,00	0,00	-0,07
Bedruckstoff: OPP	0,39	-1,00	1,00	0,29	0,40	-0,17	-0,47	-0,59	0,42	-0,42	0,52	-0,52	0,35	0,60	0,06	0,00	0,00	0,07
Pigmentart: CS	0,18	-0,29	0,29	1,00	-0,03	-0,43	-0,38	-0,34	-0,10	0,10	0,07	-0,07	-0,08	0,09	-0,03	0,00	0,00	0,04
Pigmentart: IF	0,08	-0,40	0,40	-0,03	1,00	-0,48	-0,44	-0,40	0,03	-0,03	0,07	-0,07	0,07	0,28	0,18	0,00	0,00	0,18
Pigmentart: IU	-0,06	0,17	-0,17	-0,43	-0,48	1,00	-0,23	0,34	0,31	-0,31	0,19	-0,19	0,16	-0,03	-0,08	0,00	0,00	-0,11
Pigmentart: MSC	-0,18	0,47	-0,47	-0,38	-0,44	-0,23	1,00	0,32	-0,27	0,27	-0,34	0,34	-0,17	-0,31	-0,07	0,00	0,00	-0,10
Pigmentkonz.	-0,48	0,59	-0,59	-0,34	-0,40	0,34	0,32	1,00	-0,08	0,08	-0,30	0,30	0,06	-0,42	-0,04	0,00	0,00	-0,05
HL-Trockner 1: aus	0,18	-0,42	0,42	-0,10	0,03	-0,31	-0,27	-0,08	1,00	-1,00	0,42	-0,42	0,60	0,22	-0,02	0,00	0,00	0,04
HL-Trockner 1: ein	-0,18	0,42	-0,42	0,10	-0,03	-0,31	0,27	0,08	-1,00	1,00	-0,42	0,42	-0,60	-0,22	0,02	0,00	0,00	-0,04
HL-Trockner 2: aus	0,11	-0,52	0,52	0,07	0,07	0,19	-0,34	-0,30	0,42	-0,42	1,00	-1,00	0,19	0,67	0,22	0,00	0,00	0,28
HL-Trockner 2: ein	-0,11	0,52	-0,52	-0,07	-0,07	-0,19	0,34	0,30	-0,42	0,42	-1,00	1,00	-0,19	-0,67	-0,22	0,00	0,00	-0,28
IR-Trockner 1	-0,06	-0,35	0,35	-0,08	0,07	0,16	-0,17	0,06	0,60	-0,60	0,19	-0,19	1,00	0,10	0,08	0,00	0,00	0,11
IR-Trockner 2	0,08	-0,60	0,60	0,09	0,28	-0,03	-0,31	-0,42	0,22	-0,22	0,67	-0,67	0,10	1,00	0,21	0,00	0,00	0,29
Geschwindigkeit	-0,57	-0,06	0,06	-0,03	0,18	-0,08	-0,07	-0,04	-0,02	0,02	0,22	-0,22	0,08	0,21	1,00	0,00	0,00	0,68
Schöpfvolumen	-0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Halbtonfläche	-0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
t bis Trockner	-0,53	-0,07	0,07	0,04	0,18	-0,11	-0,10	-0,05	0,04	-0,04	0,28	-0,28	0,11	0,29	0,68	0,00	0,00	1,00
<b>Glanz-Korr.koeff.</b>	Const.	Bedr.: MS	Bedr.: OPP	Pigm.: CS	Pigm.: IF	Pigm.: IU	Pigm.: MSC	Pigm.konz.	HL-Tr. 1: aus	HL-Tr. 1: ein	HL-Tr. 2: aus	HL-Tr. 2: ein	IR-Tr. 1	IR-Tr. 2	Geschw.	Schöpfvol.	Halbton	t bis Tr.
Constant	1,00	-0,51	0,51	0,23	0,22	-0,14	-0,27	-0,60	0,23	-0,23	0,32	-0,32	0,00	0,29	-0,33	-0,48	-0,45	-0,45
Bedruckstoff: MS	-0,51	1,00	-1,00	-0,29	-0,40	0,16	0,46	0,59	-0,41	0,41	-0,52	0,52	-0,35	-0,60	-0,01	0,00	0,00	0,00
Bedruckstoff: OPP	0,51	-1,00	1,00	0,29	0,40	-0,16	-0,46	-0,59	0,41	-0,41	0,52	-0,52	0,35	0,60	0,01	0,00	0,00	0,00
Pigmentart: CS	0,23	-0,29	0,29	1,00	-0,04	-0,43	-0,37	-0,33	-0,10	0,10	0,07	-0,07	-0,09	0,08	-0,07	0,00	0,00	0,00
Pigmentart: IF	0,22	-0,40	0,40	-0,04	1,00	-0,47	-0,43	-0,40	0,02	-0,02	0,02	-0,02	0,05	0,24	0,07	0,00	0,00	0,00
Pigmentart: IU	-0,14	0,16	-0,16	-0,43	-0,47	1,00	-0,24	0,34	0,32	-0,32	0,23	-0,23	0,18	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
Pigmentart: MSC	-0,27	0,46	-0,46	-0,37	-0,43	-0,24	1,00	0,32	-0,27	0,27	-0,33	0,33	-0,16	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Pigmentkonz.	-0,60	0,59	-0,59	-0,33	-0,40	0,34	0,32	1,00	-0,08	0,08	-0,30	0,30	0,07	-0,42	-0,02	0,00	0,00	0,00
HL-Trockner 1: aus	0,23	-0,41	0,41	-0,10	0,02	0,32	-0,27	-0,08	1,00	-1,00	0,42	-0,42	0,60	0,22	-0,06	0,00	0,00	0,00
HL-Trockner 1: ein	-0,23	0,41	-0,41	0,10	-0,02	-0,32	0,27	0,08	-1,00	1,00	-0,42	0,42	-0,60	-0,22	0,06	0,00	0,00	0,00
HL-Trockner 2: aus	0,32	-0,52	0,52	0,07	0,02	0,23	-0,33	-0,30	0,42	-0,42	1,00	-1,00	0,17	0,64	0,05	0,00	0,00	0,00
HL-Trockner 2: ein	-0,32	0,52	-0,52	-0,07	-0,02	-0,23	0,33	0,30	-0,42	0,42	-1,00	1,00	-0,17	-0,64	-0,05	0,00	0,00	0,00
IR-Trockner 1	0,00	-0,35	0,35	-0,09	0,05	0,18	-0,16	0,07	0,60	-0,60	0,17	-0,17	1,00	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00
IR-Trockner 2	0,29	-0,60	0,60	0,08	0,24	0,00	-0,30	-0,42	0,22	-0,22	0,64	-0,64	0,07	1,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Geschwindigkeit	-0,33	-0,01	0,01	-0,07	0,07	-0,01	0,00	-0,02	-0,06	0,06	0,05	-0,05	0,01	0,01	1,00	0,00	0,00	0,00
Schöpfvolumen	-0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Halbtonfläche	-0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
<b>Homo-Korr.koeff.</b>	Const.	Pigm.: CS	Pigm.: IF	Pigm.: IU	Pigm.: MSC	Pigm.konz.	HL-Tr. 1: aus	HL-Tr. 1: ein	HL-Tr. 2: aus	HL-Tr. 2: ein	IR-Tr. 1	IR-Tr. 2	Geschw.	Schöpfvol.	Halbton	t bis Tr.	t bis Tr.	t bis Tr.
Constant	1,00	0,07	-0,09	0,01	0,01	-0,33	0,02	-0,02	-0,12	0,12	-0,23	-0,21	-0,64	-0,45	-0,41	-0,61	-0,61	-0,61
Pigmentart: CS	0,07	1,00	-0,17	-0,40	-0,28	-0,21	-0,25	0,25	-0,10	0,10	-0,21	-0,11	-0,04	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02
Pigmentart: IF	-0,09	-0,17	1,00	-0,45	-0,31	-0,22	-0,17	0,17	-0,18	0,18	-0,09	0,05	0,17	0,00	0,00	0,17	0,17	0,17
Pigmentart: IU	0,01	-0,40	-0,45	1,00	-0,35	0,30	0,42	-0,42	0,33	-0,33	0,24	0,08	-0,07	0,00	0,00	-0,10	-0,10	-0,10
Pigmentart: MSC	0,01	-0,28	-0,31	-0,35	1,00	0,06	-0,10	0,10	-0,12	0,12	-0,01	-0,05	-0,05	0,00	0,00	-0,07	-0,07	-0,07
Pigmentkonz.	-0,33	-0,21	-0,22	0,30	0,06	1,00	0,23	-0,23	0,02	-0,02	0,36	-0,10	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
HL-Trockner 1: aus	0,02	-0,25	-0,17	0,42	-0,10	0,23	1,00	-1,00	0,26	-0,26	0,53	-0,03	-0,05	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
HL-Trockner 1: ein	-0,02	0,25	0,17	-0,42	0,10	-0,23	-1,00	1,00	-0,26	0,26	-0,53	0,03	0,05	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
HL-Trockner 2: aus	-0,12	-0,10	-0,18	0,33	-0,12	0,02	0,26	-0,26	1,00	-1,00	0,01	0,52	0,23	0,00	0,00	0,29	0,29	0,29
HL-Trockner 2: ein	0,12	0,10	0,18	-0,33	0,12	-0,02	-0,26	0,26	-1,00	1,00	-0,01	-0,52	-0,23	0,00	0,00	-0,29	-0,29	-0,29
IR-Trockner 1	-0,23	-0,21	-0,09	0,24	-0,01	0,36	0,53	-0,53	0,01	-0,01	1,00	-0,15	0,06	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09
IR-Trockner 2	-0,21	-0,11	0,05	0,08	-0,05	-0,10	-0,03	0,03	0,52	-0,52	-0,15	1,00	0,22	0,00	0,00	0,31	0,31	0,31
Geschwindigkeit	-0,64	-0,04	0,17	-0,07	-0,05	-0,01	-0,05	0,05	0,23	-0,23	0,06	0,22	1,00	0,00	0,00	0,68	0,68	0,68
Schöpfvolumen	-0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Halbtonfläche	-0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
t bis Trockner	-0,61	0,02	0,17	-0,10	-0,07	-0,01	0,01	-0,01	0,29	-0,29	0,09	0,31	0,68	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00

Kollinearität  
Korrelation aufgrund fehlender Balanciertheit  
Korrelation aus prozessbedingten Einschränkungen  
erklärbar aus Berechnung von t bis Trockner

Abbildung B.1: Korrelationsmatrizen der Zielgrößen Color-Shift, Glanz und Homogenität. Abgebildet sind die Korrelationskoeffizienten  $\rho$ , die die linearen Zusammenhänge der Einflussgrößen untereinander beschreiben.



Term Significance	
Term	Color-Shift
Constant	0,00138249 1 df In
Pigmentart	9,76476e-05 3 df In
Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,00000 1 df In
Tonwert[%]	0,00000 1 df In
t bis Trocknerbeginn [s]	2,21301e-05 1 df In
Pigmentart * Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,116280 3 df Out
Tonwert[%] * Pigmentart	1,87294e-11 3 df In
Pigmentart * t bis Trocknerbeginn [s]	2,85993e-13 3 df In
Tonwert[%] * Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,552870 1 df Out
Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ] * t bis Trocknerbeginn [s]	0,131029 1 df Out
Tonwert[%] * t bis Trocknerbeginn [s]	0,406579 1 df Out
<b>R-Square</b>	<b>0,7712</b>
<b>Adj R-Square</b>	<b>0,765493</b>
<b>RMS Error</b>	<b>3,951908911</b>
<b>Residual df</b>	<b>482</b>

**Abbildung B.2:** Lineare Regression bezüglich des Color-Shift mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen

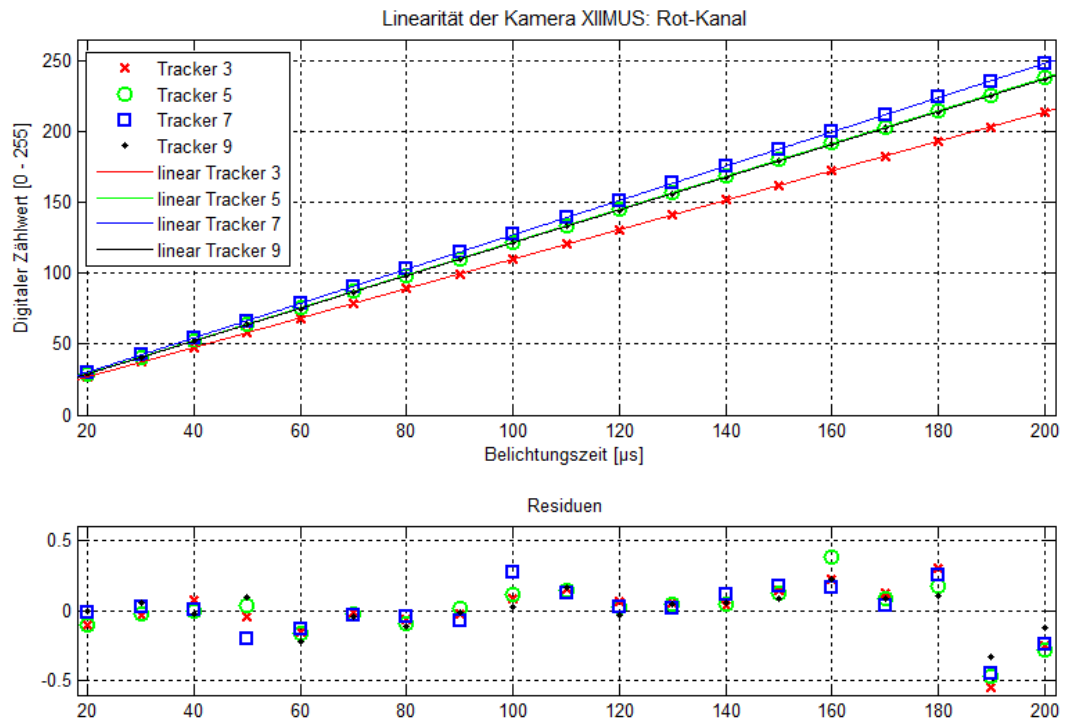
## B. TABELLEN ZUR REGRESSIONSANALYSE

Term Significance	
Term	Color-Shift
Constant	0,0845677 1 df In
Pigmentart	6,18443e-05 3 df In
Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,449660 1 df In
Tonwert [%]	6,25511e-08 1 df In
t bis Trocknerbeginn [s]	0,434249 1 df In
Pigmentart * Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,103715 3 df Out
Tonwert [%] * Pigmentart	6,39599e-12 3 df In
Pigmentart * t bis Trocknerbeginn [s]	1,00808e-13 3 df In
Tonwert [%] * Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,544244 1 df Out
Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ] * t bis Trocknerbeginn [s]	0,122814 1 df Out
Tonwert [%] * t bis Trocknerbeginn [s]	0,396417 1 df Out
Schöpfvol. [cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ] <sup>2</sup>	0,0113051 1 df In
Tonwert [%] <sup>2</sup>	3,02788e-05 1 df In
t bis Trocknerbeginn [s] <sup>2</sup>	0,824521 1 df In
<b>R-Square</b>	<b>0,7822</b>
<b>Adj R-Square</b>	<b>0,775397</b>
<b>RMS Error</b>	<b>3,867554763</b>
<b>Residual df</b>	<b>479</b>

Abbildung B.3: Quadratische Regression bezüglich des Color-Shift mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen

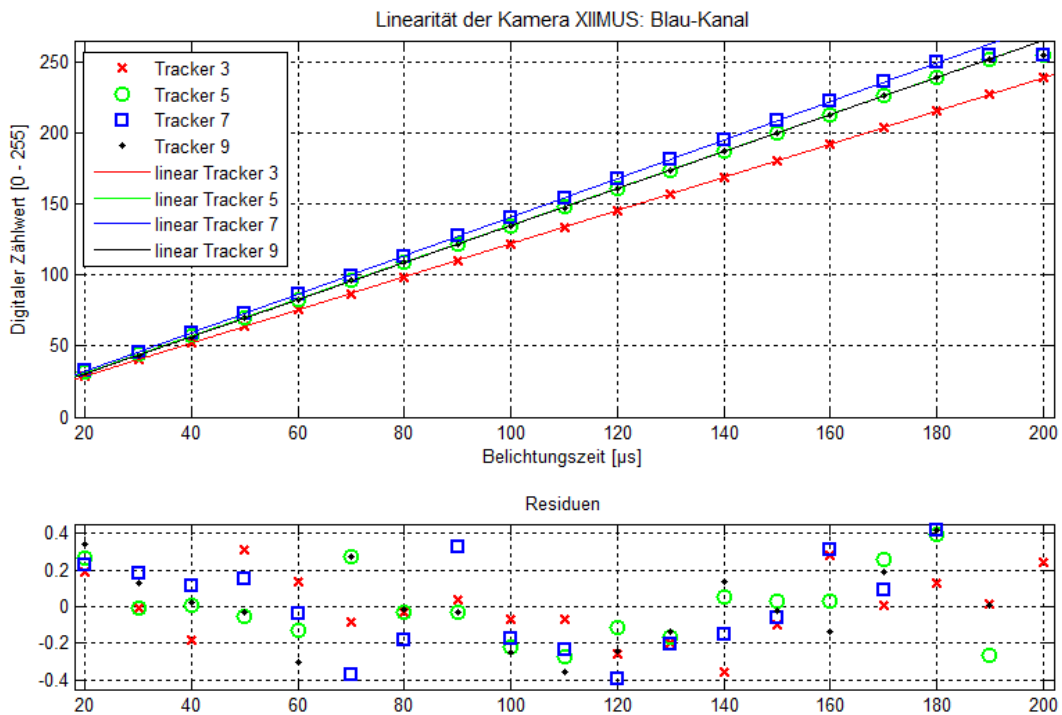
## Anhang C

# Kamerabasierte Messungen

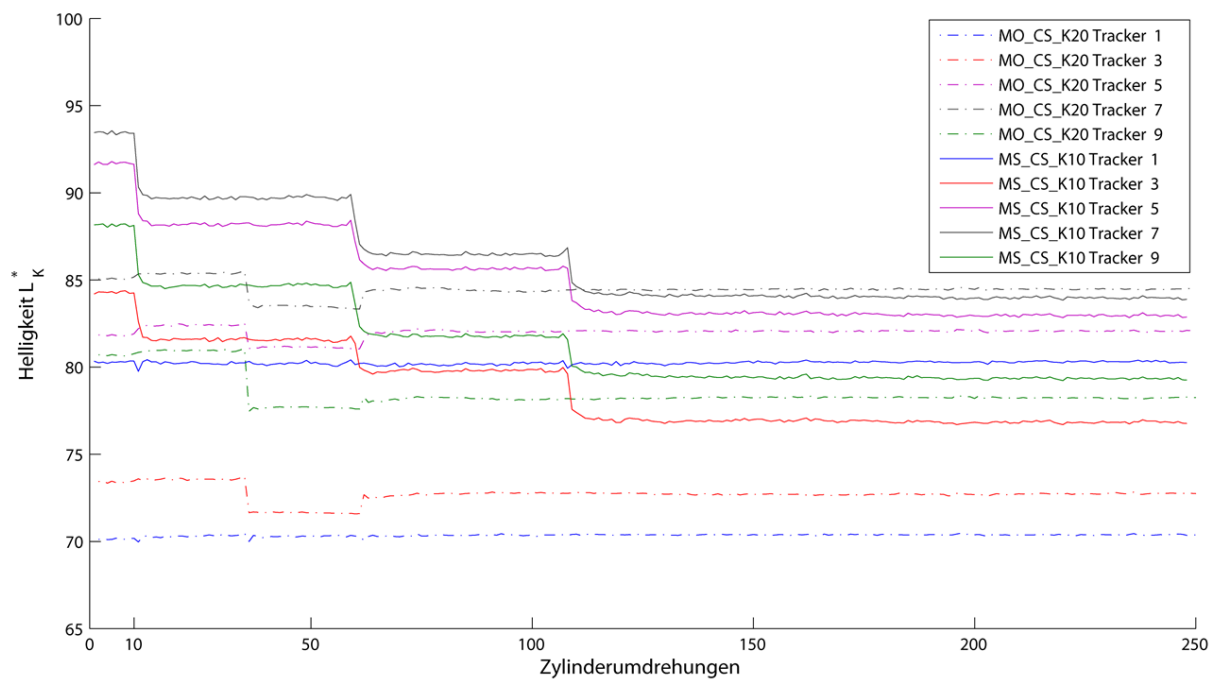


**Abbildung C.1:** Ausgabewerte der Tracker 3, 5, 7 und 9 des Rot-Kanals der Kamera *XIIMUS* von *TVI-Vision* über die Belichtungszeit. Es ist eine sehr gute Linearität der Kamera durch die kleinen Residuen der linearen Fits der einzelnen Trackerwerte erkennbar. Die Steigungen der Geraden unterscheiden sich aufgrund einer nicht ganz homogenen Beleuchtung über die Druckbreite.

## C. KAMERABASIERTE MESSUNGEN

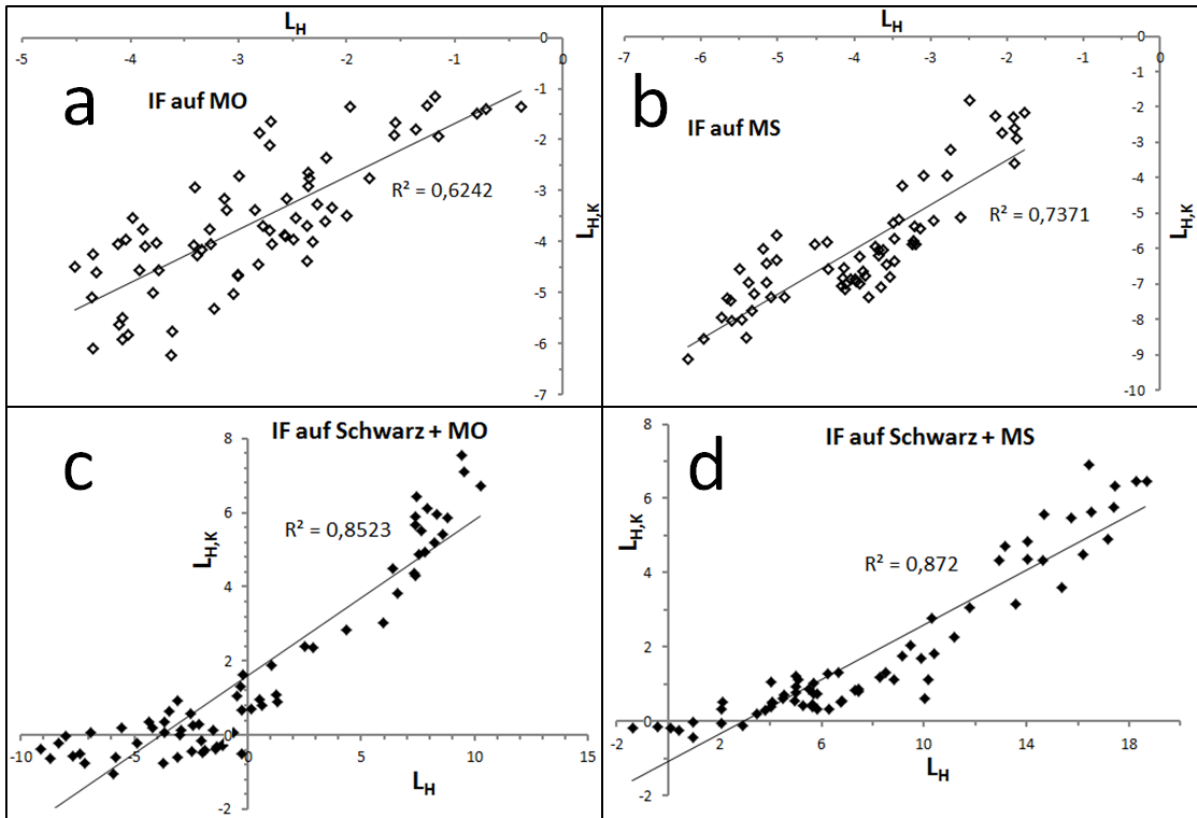


**Abbildung C.2:** Ausgabewerte der Tracker 3, 5, 7 und 9 des Blau-Kanals der Kamera *XIIMUS* von *TVI-Vision* über die Belichtungszeit. Es ist eine sehr gute Linearität der Kamera durch die kleinen Residuen der linearen Fits der einzelnen Trackerwerte erkennbar. Die Steigungen der Geraden unterscheiden sich aufgrund einer nicht ganz homogenen Beleuchtung über die Druckbreite. Ab einer Belichtungszeit  $> 170 \mu s$  ist der maximale Wert des Kamera-Sensors (255) erreicht und die Linearität der Kamera beendet. Diese Werte werden vom Fit ausgeschlossen.

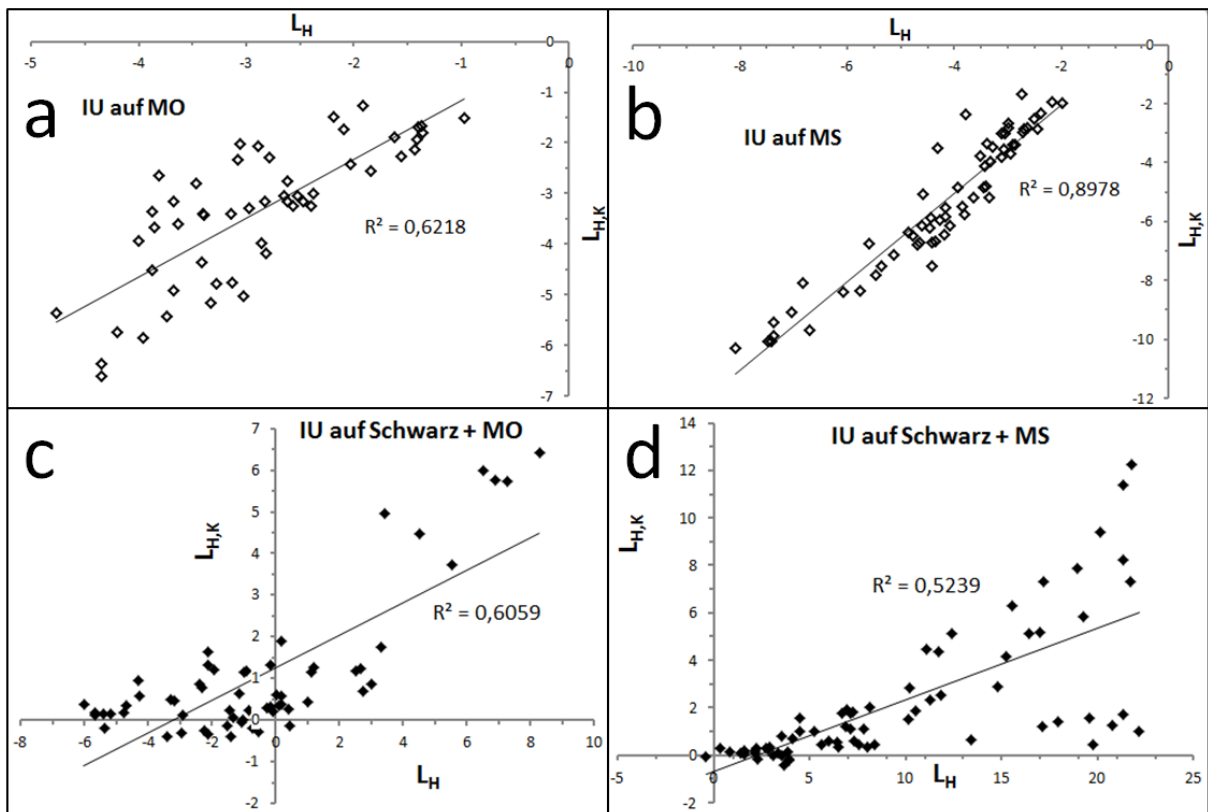


**Abbildung C.3:** Helligkeit  $L_K^*$  der Tracker auf weißem Unterdruck aufgetragen über die Zylinderumdrehungen (Druckgeschwindigkeit  $26 \frac{m}{min}$ ). Es sind die unterschiedlichen Kurvenverläufe der Tracker 1, 3, 5, 7 und 9 erkennbar (vergleiche Abbildung 6.4). Die Tracker entstammen zwei Druckversuchen; einer mit 20%iger *Colorstream*<sup>®</sup> *Arctic Fire* (CS) Pigmentkonzentration auf *Maxi Offset* (MO), der andere mit 10% Pigmentanteil auf *Maxi Satin* (MS).

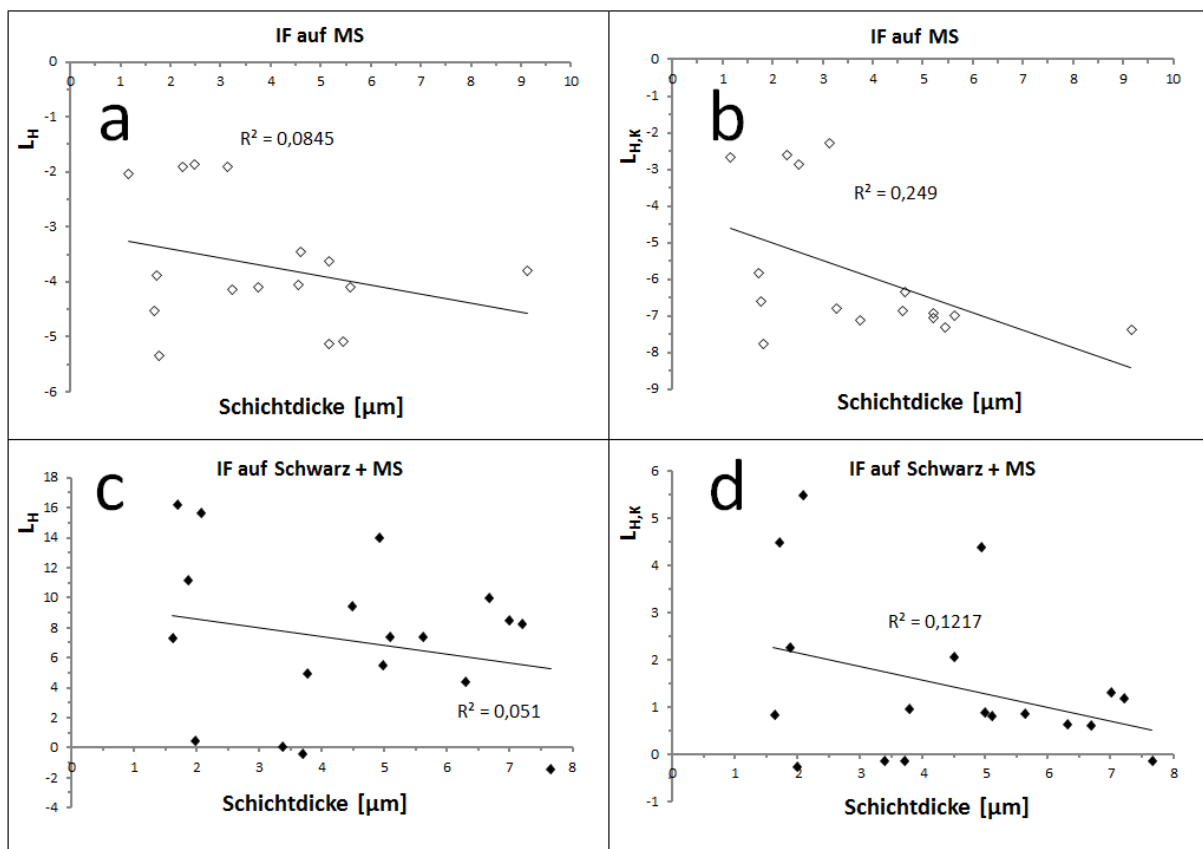
## C. KAMERABASIERTE MESSUNGEN



**Abbildung C.4:** Vergleich der mit dem MA98 gemessenen  $L_H$ -Werte mit den aus den Kameradaten berechneten  $L_{H,K}$ -Werten bei Iriodin<sup>®</sup> Rutil Feinrot (IF) Effektpigmentfarben auf den Bedruckstoffen *Maxi Offset* (MO) und *Maxi Satin* (MS) ohne (a und b) und mit (c und d) schwarzem Unterdruck. Aufgetragen sind die  $L_{H,K}$ -Werte über die  $L_H$ -Werte. Dargestellt sind die Geraden der linearen Regressionen der Messwerte zusammen mit ihren Bestimmtheitsmaßen  $R^2$ .



**Abbildung C.5:** Vergleich der mit dem MA98 gemessenen  $L_H$ -Werte mit den aus den Kameradaten berechneten  $L_{H,K}$ -Werten bei Iridium® Ultra Rot (IU) Effektpigmentfarben auf den Bedruckstoffen Maxi Offset (MO) und Maxi Satin (MS) ohne (a und b) und mit (c und d) schwarzem Unterdruck. Aufgetragen sind die  $L_{H,K}$ -Werte über die  $L_H$ -Werte. Dargestellt sind die Geraden der linearen Regressionen der Messwerte zusammen mit ihren Bestimmtheitsmaßen  $R^2$ .



**Abbildung C.6:** Helligkeitsdifferenzen  $L_H$  (a und c) und  $L_{H,K}$  (b und d) aufgetragen über gemessene Schichtdicke für Irividin® Rutil Feinrot (IF) Effektfarben auf dem Bedruckstoff Maxi Satin (MS) ohne (a und b) oder mit (c und d) schwarzem Unterdruck. Zusätzlich angegeben sind die Geraden der linearen Regressionen zusammen mit ihren Bestimmtheitsmaßen  $R^2$ .



*Aus Gründen des Datenschutzes ist in der Online-Version dieser Arbeit kein Lebenslauf des Verfassers erhalten.*